

Beworteling van grasland en droogtetolerantie

*Maatregelen voor een
diepere beworteling*

*Boki Luske¹
Joachim Deru¹
Henk Wösten²
Jack Faber²
Nick van Eekeren¹*

¹LBI
²Alterra



ALTERRA
WAGENINGEN UR



skb
duurzame
ontwikkeling
ondergrond

© 2012 Louis Bolk Instituut

Beworteling van grasland en droogtetolerantie.

Maatregelen voor een diepere beworteling.

*Root development of grasslands and drought
tolerance. Measures to increase root depth.*

English summary page 9.

Boki Luske (LBI), Joachim Deru (LBI), Henk
Wösten (Alterra), Jack Faber (Alterra), Nick van
Eekeren (LBI)

Publicatienummer 2012-028 LbD

www.louisbolk.nl

Voorwoord

Het project “Kijk eens wat vaker onder de graszode” heeft als centraal doel om duurzaam bodem beheer te stimuleren door klimaatadaptatie in de agrarische praktijk. Dit project wordt uitgevoerd in het programma Duurzame Ontwikkeling Ondergrond van de Stichting Kennisontwikkeling en Kennisoverdracht Bodem (SKB). Doel van dit programma is ontwikkelen en delen van kennis en ervaring over verantwoord gebruik en beheer van bodem en ondergrond ten behoeve van publieke en private praktijkontwikkeling.

Het project wordt uitgevoerd door Arcadis, Alterra en het Louis Bolk Instituut in opdracht van de Provincie Utrecht, Waterschap Vallei en Eem en SKB.

Deze rapportage is onderdeel van spoor 2, deelresultaat 4.

In eerdere fases van dit project is gebleken dat een diepe en intensieve beworteling van grasland op zandgrond een belangrijke parameter is voor droogtetolerantie. Om aan te geven welke maatregelen agrariërs kunnen treffen om de beworteling van hun grasland te verbeteren zijn de literatuur en langjarige proeven geraadpleegd.

De auteurs

November 2012

Inhoud

Samenvatting	9
Summary	11
1 Inleiding	13
1.1 Aanleiding	13
1.2 Leeswijzer	13
2 Beworteling van grasland in het algemeen	15
3 Maatregelen voor betere beworteling: literatuur en langjarige proeven	21
3.1 Bodem	21
3.1.1 <i>Bodemfysisch</i>	21
3.1.2 <i>Bodemchemisch</i>	23
3.1.3 <i>Bodembologisch</i>	24
3.2 Gewas	25
3.2.1 <i>Maatregelen bij inzaai</i>	25
3.2.2 <i>Grassoorten, rassen en veredeling</i>	27
3.3 Management	28
3.3.1 <i>Bemesting</i>	28
3.3.2 <i>Maaien en beweiden</i>	30
3.3.3 <i>Leeftijd grasland, grondbewerking en vruchtwisseling</i>	34
3.4 Overige factoren	34
3.4.1 <i>Vochtvoorziening</i>	34
3.4.2 <i>Lichtintensiteit en temperatuur</i>	34
3.5 Samenvattend overzicht factoren en maatregelen die de beworteling beïnvloeden	35
4 Scenario's worteldiepte	41
5 Discussie en conclusie	43
5.1 Maatregelen voor droogtetolerantie van grasland	43
5.2 Scenario's	43
5.3 Betekenis voor de agrarische praktijk	44
5.4 Betekenis voor modelleren van waterbalansen	44
Referenties	45
Appendix: lijst van grassoorten met botanische en Nederlandse naam	51

Samenvatting

Door het veranderende klimaat is er op zandgrond behoefte aan verbetering van de droogtetolerantie van graslanden. Uit eerdere fases van dit onderzoek is gebleken dat de bewortelingsdiepte de droogtetolerantie van graslanden vergroot.

Dit onderzoek laat zien dat er een breed scala aan maatregelen beschikbaar is om de beworteling van grasland te verbeteren. Aan de hand van de literatuur en langlopende proeven zijn de meest veelbelovende maatregelen om de bewortelingsdiepte van grasland te bevorderen op een rijtje gezet. Preventie van bodemverdichting door vertrapping en structuurschade en werken aan de herstelcapaciteit van de bodem is belangrijk. Maatregelen die hierbij horen zijn: verhogen van het organische stof gehalte, op peil houden van de pH en bevorderen van aantallen en activiteit van wormen. Ook kunnen er maatregelen genomen worden bij de inzaai van graslanden door snelgroeïende diepwortelende gewassen als dekvrucht te gebruiken en diepwortelende grassoorten of grasrassen te kiezen. Via de bemesting kan de beworteling verbeterd worden door de N-gift te verlagen, de N-gift uit te stellen na maaien en deze toe te dienen onder het maaiveld. Hoger maaien en minder frequent maaien of beweiden vallen ook onder de management opties voor een betere beworteling.

Het is (nog) niet voor alle maatregelen mogelijk om het effect ervan op de worteldiepte te kwantificeren. Wel is er voor twee grondsoorten (beekeerd- en enkeerdgrond) bekeken wat het effect is van het vergroten van de bewortelingsdiepte (15, 20, 25 en 30 cm). Voor deze scenario's geldt dat de hoeveelheid beschikbaar water in de wortelzone rechtlijnig toeneemt met de bewortelingsdiepte. Om de bovengenoemde management maatregelen in de agrarische praktijk te brengen zijn er verschillende routes mogelijk. Er moet met agrariërs worden samengewerkt, waardoor de kennis kan worden overgedragen en agrariërs bewust worden van de mogelijkheden. Belangrijk is dat de maatregelen deel uit gaan maken van een structureel raamwerk, bijvoorbeeld gekoppeld zijn aan het verstrekken van vergunningen voor beregening, onderdeel zijn van een demoregeling, of opgenomen worden in de blauw-groene diensten binnen de herziening van het GLB.

Summary

Due to the changing climate, Dutch dairy farmers on sandy soils face problems during dry summer periods. They have to improve drought tolerance of their pastures in order to secure fodder production. Earlier phases of this research indicated that root depth significantly affects drought tolerance.

This literature study shows that a wide range of management measures is available to improve root development of grasslands and lists the most promising measures. Prevention of soil compaction and improving soil resilience are both important. Relating measures that can be taken are increasing soil organic matter, maintaining the pH of the soil, and promotion of the number and activity of earthworms. Measures can also be taken during the sowing of grasslands, for instance to combine the sowing of grass with deep rooting crops like barley. There are deep rooting grass species or varieties available. Alternative fertilizing schemes can also enhance root depth. By lowering or delaying N fertilization, and application under meadow surface are potential measures. A higher mowing level and a lower mowing frequency also improve root development of grasslands.

It is not (yet) possible to quantify the effects of all these measures on root depth. For two Dutch sandy soil types the effects of increased root depths have been analysed. Both scenario's show that the amount of available water in the root zone linearly increases with root depth.

To test the affectivity and practical feasibility of these measures, field trials should be done in cooperation with farmers. Apart from that, the awareness of farmers for climate adaption should be improved. At this moment they are not aware of the fact that drought tolerance of grasslands can be improved by the above mentioned measures.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Uit eerdere fases van dit project is gebleken dat de beworteling van grasland een belangrijke parameter is voor droogteresistentie van graslanden.

Dit is geconstateerd door middel van het vastleggen van de bodem- en waterkarakteristieken van 20 bodemprofielen in de Gelderse Vallei. De bodemprofielen zijn in het veld onderzocht en de bodemmonsters zijn geanalyseerd in het lab (Faber et al., 2012¹). Met deze gegevens zijn de bodemprofielen geclusterd en is er onderzocht welke eigenschappen het meeste invloed hebben op de droogtetolerantie van het grasland. Hieruit is gebleken dat er twee duidelijke clusters konden worden onderscheiden, die achteraf bleken samen te vallen met een onderverdeling in tweebodemtypes; beekeerd en enkeerd. Voor beide bodemtypen geldt dat de hoeveelheid beschikbaar water in de wortelzone rechtlijnig toeneemt met de bewortelingsdiepte (Wösten, 2012²).

Citaat: "Samenvattend kan worden gesteld dat de hoeveelheid makkelijk beschikbaar vocht in de wortelzone voor de beekeerdgronden iets groter is dan voor de enkeerdgronden. Deze hoeveelheid neemt echter rechtlijnig toe met de worteldiepte. Om vochttekorten te voorkomen is het dus van belang om diepe beworteling te stimuleren..." (Wösten, 2012²)

Een diepere beworteling heeft direct een positief effect op de hoeveelheid beschikbaar water in de wortelzone. Om vochttekorten in droge periodes te voorkomen is het dus van belang om diepe beworteling te stimuleren.

Dit is het vertrekpunt geweest voor dit literatuuronderzoek. De vragen die in dit onderzoek worden beantwoord zijn:

1. Wat is er bekend over graslandbeworteling vanuit langjarige en kortlopende experimenten?
2. Welke maatregelen kunnen boeren treffen om de beworteling van grasland te stimuleren?
3. Wat betekenen deze bevindingen voor de agrarische praktijk?

1.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft enkele achtergronden van de beworteling van grasland. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de factoren die de beworteling van grasland beïnvloeden. Het hoofdstuk is opgebouwd uit 4 paragrafen: maatregelen gericht op de 1) bodem, 2) gewas, 3) management en 4) overige factoren. Uitgaande van de factoren uit de literatuur zijn hiermee managementmaatregelen afgeleid die de beworteling kunnen verbeteren en op deze manier droogtetolerantie vergroten.

Hoofdstuk 4 gaat in op twee scenario's om aan te geven wat het effect is van een diepere beworteling voor grasland op twee bodemtypen. In hoofdstuk 5 wordt de betekenis voor de agrarische praktijk, de modellering en het waterbeheer besproken.

¹ Onderzoek vochtvasthoudend vermogen bodem Gelderse Vallei. Spoor 1 deelrapport 1 van het project "Kijk eens wat vaker onder graszode".

² Modelontwikkeling, Spoor 1 deelrapport 2 van het project "Kijk eens wat vaker onder de graszode".

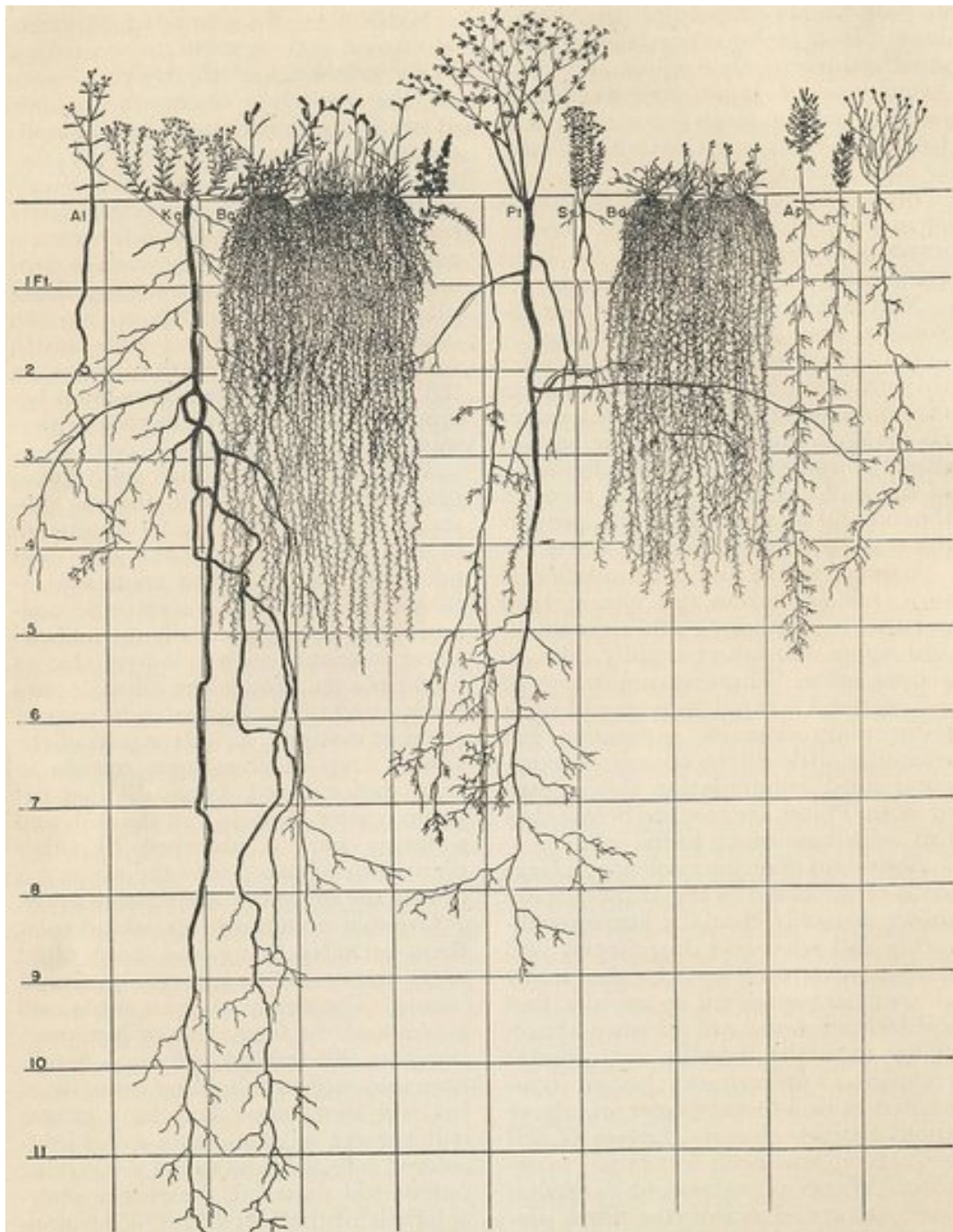
2 Beworteling van grasland in het algemeen

Worteldiepte is op ecosysteem niveau sterk gerelateerd aan de hydrologische balans en kan sterk verschillen tussen ecosysteem typen. In gebieden met lange droogte periodes als woestijnen en savannes zijn worteldieptes gevonden van maar liefst 50 en 60 meter (Canadell, 1996). Voor graslanden is de maximale bewortelingsdiepte in gematigde gebieden gemiddeld 2,5 m, bepaald door biotische en abiotische factoren.

Het is bekend dat beworteling niet los kan worden gezien van de bodemkwaliteit (Van Eekeren et al., 2007). Gras, beworteling, bodemleven en bodem vormen een zichzelf versterkende cyclus (Figuur 1). Beworteling geeft voedsel en leefruimte voor het bodemleven. Dit bodemleven zorgt voor een betere bodemstructuur en nutriëntenvoorziening, waarmee de gewasgroei en de beworteling weer versterkt worden. Binnen deze cyclus speelt de beworteling een centrale rol. Door sub-optimale groeiomstandigheden van de ondergrond kan de groei van graslanden stagneren. Er ontstaat een neergaande spiraal. Met een slechte beworteling kunnen nutriënten niet goed worden opgenomen en neemt de kans op verdroging toe, waardoor de boven- en ondergrondse groei afneemt.



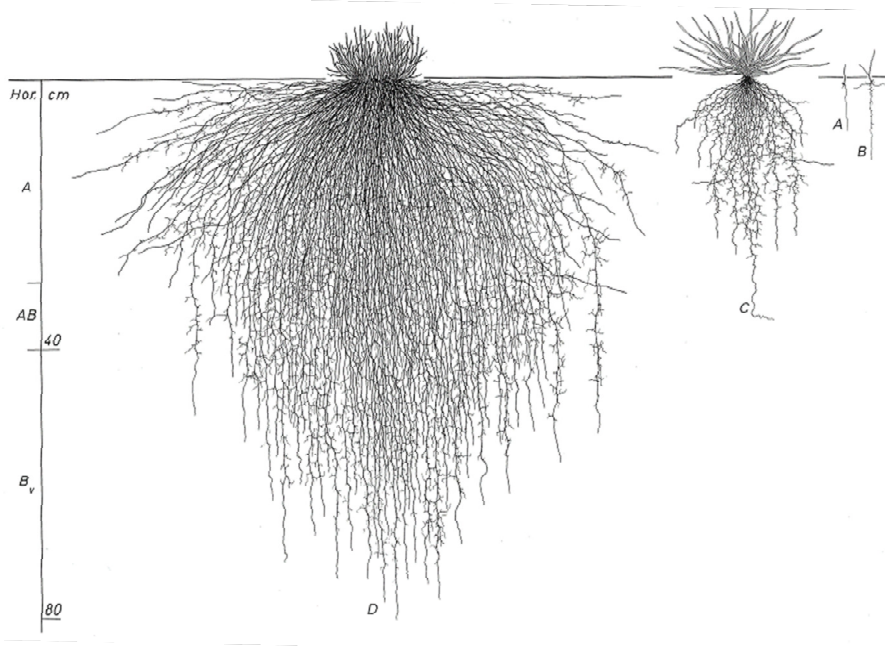
Figuur 1. De bodemleven-, gewas- en bewortelingscyclus (Van Eekeren et al., 2007)



Figuur 2. Wortelstelsels van verschillende plantensoorten in de staat Kansas, USA, waarvan Bg en Bd grassoorten zijn. Al = *Allionia linearis*; Kg = *Kuhnia gutturosa*; Bg = *Bouteloua gracilis*; Mc = *Malvastrum coccineum*; Pt = *Psoralea tenuiflora*; Ss = *Sideranthus spinulosus*; Bd = *Buchloe dactyloides*; Ap = *Ambrosia psilostachya*; Lj = *Lygodesmia juncea* (Weaver en Albertson, 1943).

Grassen hebben zoals de andere eenzaadlobbigen een typische vezelige wortelstructuur: dunne vezelige wortels zonder of met minimale secundaire diktegroei en vertakkingen (Figuur 2; Figuur 3). Dit in tegenstelling tot tweezaadlobbigen die over het algemeen een wortelstructuur hebben met een hoofdwortel, diktegroei en vertakkingen. Hiermee heeft gras een relatief zeer uitgebreid en fijnmazig wortelstelsel (Tabel 1).

Zowel wortelbiomassa, wortellengtedichtheid als de wortelharenoppervlakte bij gras zijn soms vele malen hoger dan die van tweezaadlobbigen. Het aandeel wortels in de bovengrond is daarbij groter dan eenjarige landbouwgewassen (83% in de bovenste 30 cm versus 70% bij akkerbouwgewassen) (Jackson et al., 1996).



Figuur 3. Wortelstelsel van Engels Raaigras in verschillende groeistadia, gezaaid begin maart. A: 2 weken na zaaien; B: 4 weken na zaaien; C: 10 weken na zaaien; D: 61 weken na zaaien (14 maanden) (Kutschera en Lichtenegger, 1982)

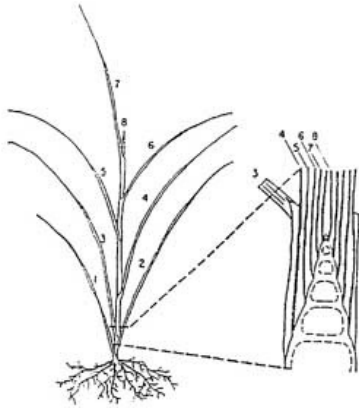
Tabel 1. Verschillende parameters van de beworteling van gras vergeleken met die van een tweezaadlobbige plant als witte klaver. Waardes zijn metingen van proeven beschreven in wetenschappelijke literatuur.

Parameter	Gras	Tweezaadlobbige Witte klaver	Referentie
Wortelbiomassa (t/ha)	7,7	0,3	Young (1958)
Wortellengtedichtheid (cm/cm ³ grond) (bij 1,3 g/cm ³)	14,3-18,8	1,7-4,3	Tisdall en Oates (1979), Evans (1978)
Wortel diameter (mm)	0,19	0,26	Evans (1977)
Wortelharen lengte (mm)	0,23	0,55	Evans (1977)
Wortelharen oppervlakte (mm ²)	1230	490	Evans (1977)
Macroporiën (%)	24	45	Mytton et al. (1993)

Groeiwijze van graswortels

Meerjarige grassen hebben zich in de evolutie door middel van twee mechanismen aangepast aan grazers:

1. de groeipunten zitten laag bij de grond (Figuur 4)
2. in het wortelstelsel kunnen energiereserves opgeslagen worden waarmee snelle hergroei na begrazing mogelijk is.



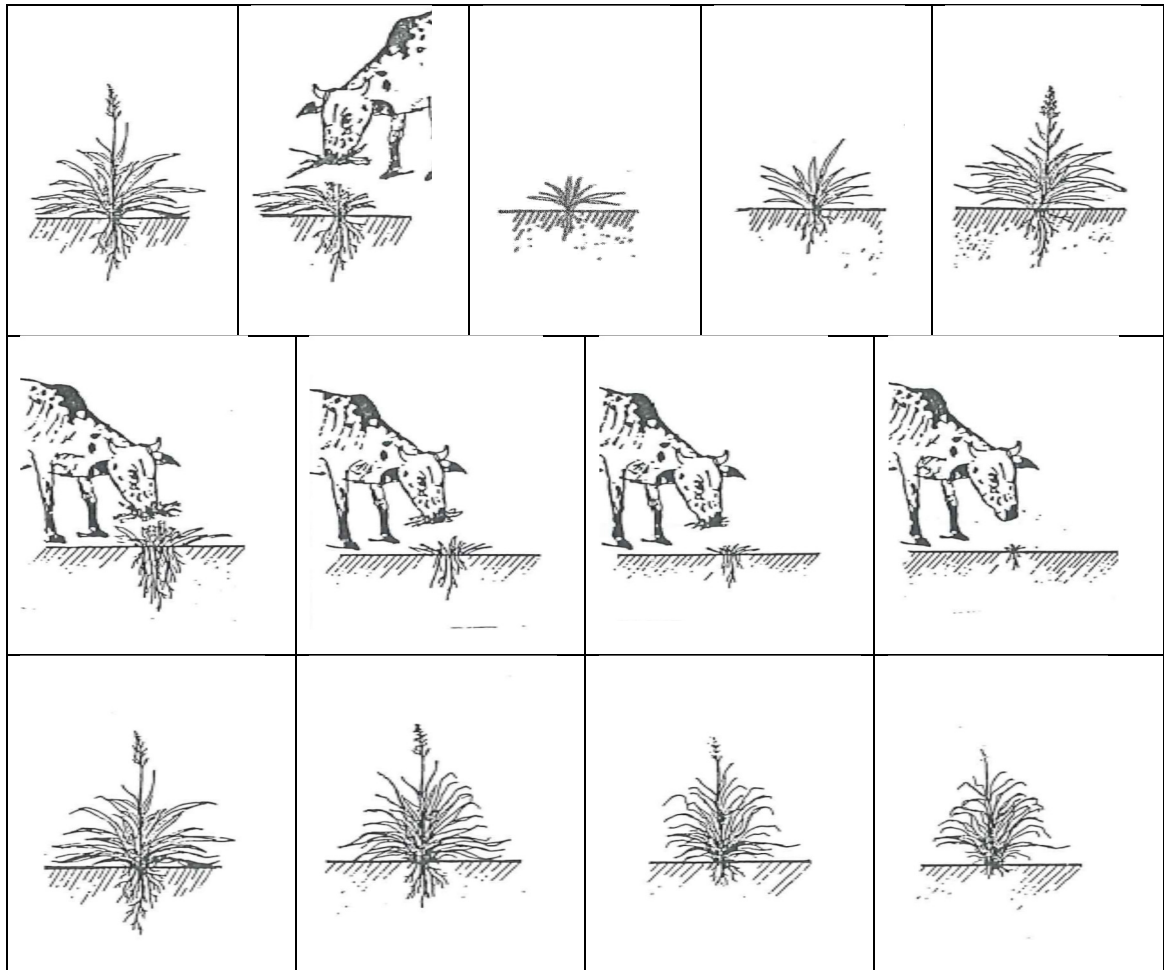
Figuur 4. De groeipunten van gras zitten laag bij de grond.

Met een normale graasdruk zijn er na beweiden vier groeifases te onderscheiden (Bingham et al. 1984; Savory, 1988; Figuur 5 boven):

- *Fase 1.* Als een gras wordt beweiden of gemaaid, loopt het na 3 dagen weer uit. Dit kost energie, waarvoor wortelreserves worden gebruikt. Hierdoor sterft het wortelstelsel gedeeltelijk af.
- *Fase 2.* Het jonge blad heeft een klein bladoppervlak, waardoor er via de fotosynthese weinig energie wordt vastgelegd. De eerste grasgroei is traag en komt voor een groot deel uit de wortelreserves.
- *Fase 3.* Het bladoppervlak breidt uit. De bladassimilatie neemt de energietoevoer vanuit de wortels geleidelijk over. Er is een snellere groei van de plant zichtbaar.
- *Fase 4.* Het bladoppervlak is zo groot, dat er meer energie wordt gevormd dan er gebruikt wordt voor bovengrondse blad- en stengelgroei. Deze energie wordt opgeslagen in de wortels.

Op graslanden die begraasd of gemaaid worden is dus sprake van bruto en netto groei van het wortelstelsel. Onder- en overbegrazing hebben ook hun weerslag op het wortelstelsel (Figuur 5, midden en onder).

NB. Door de voortdurende groei en afbraak van graswortels, die ook nog eens verschilt door seizoensinvloeden (Schaffers et al., 2010), zijn onderzoeksresultaten niet altijd met elkaar te vergelijken. De totale seizoensproductie (root turnover of bruto wortelgroei) van Engels raaigras kan veel hoger liggen dan dat op een bepaald moment gemeten wordt (Stewart en Frank, 2008; Steingrobe et al., 2001; Gibbs en Reis, 1992).



Figuur 5. Boven- en ondergrondse groei van gras na begrazing, bij gemiddelde begrazing (boven), overbegrazing (midden) en onderbegrazing (onder) (Van Eekeren, 1993).

3 *Maatregelen voor betere beworteling: literatuur en langjarige proeven*

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van literatuur en langjarige proeven waarin de correlatie is onderzocht tussen omgevingsfactoren en beworteling. Op basis daarvan worden maatregelen voorgesteld waarmee een betere beworteling van grasland bereikt kan worden.

3.1 *Bodem*

Wortelgroei is voor een groot deel afhankelijk van de biologische-, fysische- en chemische bodemvruchtbaarheid. Een deel van deze factoren zijn inherent aan de grondsoort of zijn alleen op de lange termijn door maatregelen te beïnvloeden.

3.1.1 *Bodemfysisch*

Bodemstructuur, water en zuurstof

Bodemverdichting zorgt direct voor een beperking van de beworteling. Uit onderzoek is gebleken dat bodemverdichting ook op de langere termijn de beworteling van grasland kan beperken (Douglas et al., 1991) en zorgt voor een verlaging van de bovengrondse opbrengst (Houlbrooke et al. 1997).

Volgens Kutschera et al. (2009) vormt bodemverdichting, naast de fysieke weerstandstoename, een beperking voor beworteling (Figuur 6), door de afname van de grootte van de poriën. Dit zorgt ervoor dat de lucht- en vochtbeschikbaarheid in de bodem worden beperkt. Bij een tekort aan water probeert het wortelstelsel de natte delen van de bodem te doorwortelen, wanneer de bodemstructuur dit toelaat. Deze investering in wortelstelsel kost echter zelf water. Onder te natte omstandigheden kan het wortelstelsel door zuurstoftekort afsterven (Van Eekeren et al., 2003).

Beweiden onder slechte omstandigheden kan door vertrapping leiden tot bodemverdichting en daardoor afname van het wortelstelsel. Dit effect is sterker bij grasklaver dan bij puur gras, vanwege de dikkere wortels van klaver (Vertes et al., 1988). In Engels onderzoek met gras-klaver werd met de begrazing van schapen onder slechte omstandigheden een reductie van 47% in wortelmassa gevonden (Curll en Wilkins, 1983).

Een maatregel voor een goede beworteling is preventie van bodemverdichting.



Figuur 6. Maïswortels en verdichting. Links: normale dichtheid; rechts: verdichte grond (Kutschera et al., 2009).

Organische stof

In de relatie tussen bodem en beworteling speelt organische stof een belangrijke rol. Organische stof biedt namelijk op meerdere vlakken goede omstandigheden voor beworteling. Organische stof heeft een groot watervasthoudend vermogen en een lage weerstand voor beworteling. Daarnaast biedt organische stof via mineralisatie voldoende nutriënten voor gras om te groeien. Er lijkt dan ook een sterke relatie te zijn tussen beworteling en de diepte van de zwarte laag (Van Eekeren en Bokhorst, 2009).

Dit heeft te maken met de positieve terugkoppeling die bestaat tussen wortelgroei en organische stof, via de afgifte van energierijke wortellexudaten door de worteltoppen. Er ontstaat een verhoging van de microbiële activiteit rondom die wortel.

In bewortelde grond is de afbraak van bodemorganische stof tijdens het groeiseizoen sneller dan in niet bewortelde grond. De microbiële groei en de hoge C/N ratio van exudaten veroorzaken een nutriëntentekort (bijv. van N). Hierdoor breken microben de omgevende organische stof versneld af, om daaruit nutriënten te halen. Netto komen door die afbraak en bij afsterven van de microben nutriënten vrij voor de plant. Fotosynthese-intensiteit en wortelgroei zijn de belangrijkste factoren die invloed hebben op de afgifte van exudaten en zorgen indirect voor de mobilisatie van nutriënten (Kuzyakov, 2002).

De samenstelling en verdeling van de organische stof blijkt ook effect te hebben op beworteling van gras. Organische stof met een lage C:N verhouding laat een snellere wortelgroei zien (Hodge et al., 2000). Ook lijkt een concentratie van organische stof in één laag een grotere wortelbiomassa te veroorzaken van gras-klover (Kreuzer et al. 2004).

Een maatregel om het organisch stof gehalte hoog te houden zal bijdragen aan een lagere indringingsweerstand, en een afgestemde nutriëntenlevering via wortellexudaten en gunstige vochthuishouding van de bodem. Een hoog organisch stof gehalte is ook gunstig voor de aantallen

regenwormen (zie 2.1.3). Dit kan worden bereikt door het verhogen van de aanvoer van organische stof.

3.1.2 Bodemchemisch

Zuurtegraad

Een lage pH heeft een negatieve invloed op de beworteling. Door toevoeging van kalk, rockfosfaat of bijproducten van kolen-verbranding aan een zeer zure leemgrond (pH 3,9) nam de wortelmassa van Engels raaigras toe (He et al., 1999). Als gevolg van de pH-verhoging neemt de beschikbaarheid van Ca en Mg toe.

Het op peil houden van de pH is daarmee een maatregel die de beworteling vergroot.

Fosfaattoestand van de bodem

Onder een lage P-toestand kan een verhoging van de P-toestand een positief effect op de beworteling hebben. Wanneer de P-toestand ruim wordt groeit de bovengrondse massa relatief sneller dan de wortels, waardoor het relatieve aandeel van de beworteling kleiner wordt. Daardoor is een verhoging van de wortel-spruitverhouding een typisch respons op P-tekort (Gales, 1979). Ook uit langjarige proeven met gerst is dit gebleken (Davidson, 1969a; Föhse et al., 1988; Steingrobe et al., 2001). De wortelomzet (bruto groei) neemt toe bij een tekort aan P. Echter, een één op één verband met de fosfaattoestand in de bodem kan niet worden gevonden. Er zijn namelijk ook tegengestelde beweringen aangetoond (Goedewagen, 1954).

De mate van P-tekort is ook van invloed op de beworteling, de spruitgroei en de wortelmorfologie (Powell, 1977):

- Zeer lage P-toestand: het gras kan te weinig P opnemen waardoor groei van zowel wortel als spruit na een korte groeiperiode stoppen.
- Lage P-toestand: het gras neemt genoeg P op om wortelgroei te handhaven, maar er is niet genoeg P over voor spruitgroei, waardoor deze stagneert.
- Normale P-toestand: er kan genoeg P worden opgenomen om zowel wortel als spruit door te laten groeien. Door de goede beworteling is de P-benutting hoger dan bij een lagere P-toestand.
- Bij een lage P-toestand worden de wortels kort en dik.
- Bij een normale P-toestand waren de wortels even dun als de wortels van de zode.
- Een zode neemt P sneller en meer op dan planten die alléén groeien.
- Zode heeft veel meer wortellengte, dunnere wortels, hogere opbrengst en P-opname dan planten die alleen groeien.

Blijkbaar heeft de P-toestand van de bodem een grote invloed op de beworteling, maar kan deze zowel negatief als positief uitpakken. Ook andere factoren zoals vochniveau (Davidson, 1969a; Gales, 1979), interacties met andere nutriënten (Forde en Lorenzo, 2001) en bodemtype zijn van invloed. Voor zandgronden blijkt de benodigde P-concentratie voor optimale plantengroei hoger te zijn (Pant et al., 2004).

Een potentiële maatregel in relatie tot bovenstaande zou kunnen zijn om een goede zodedichtheid handhaven.

3.1.3 Bodembiologisch

Regenwormen

Regenwormen beïnvloeden met de volgende activiteiten in de bodem direct en indirect de beworteling van gras (Scheu, 2003; Van Eekeren et al. 2003):

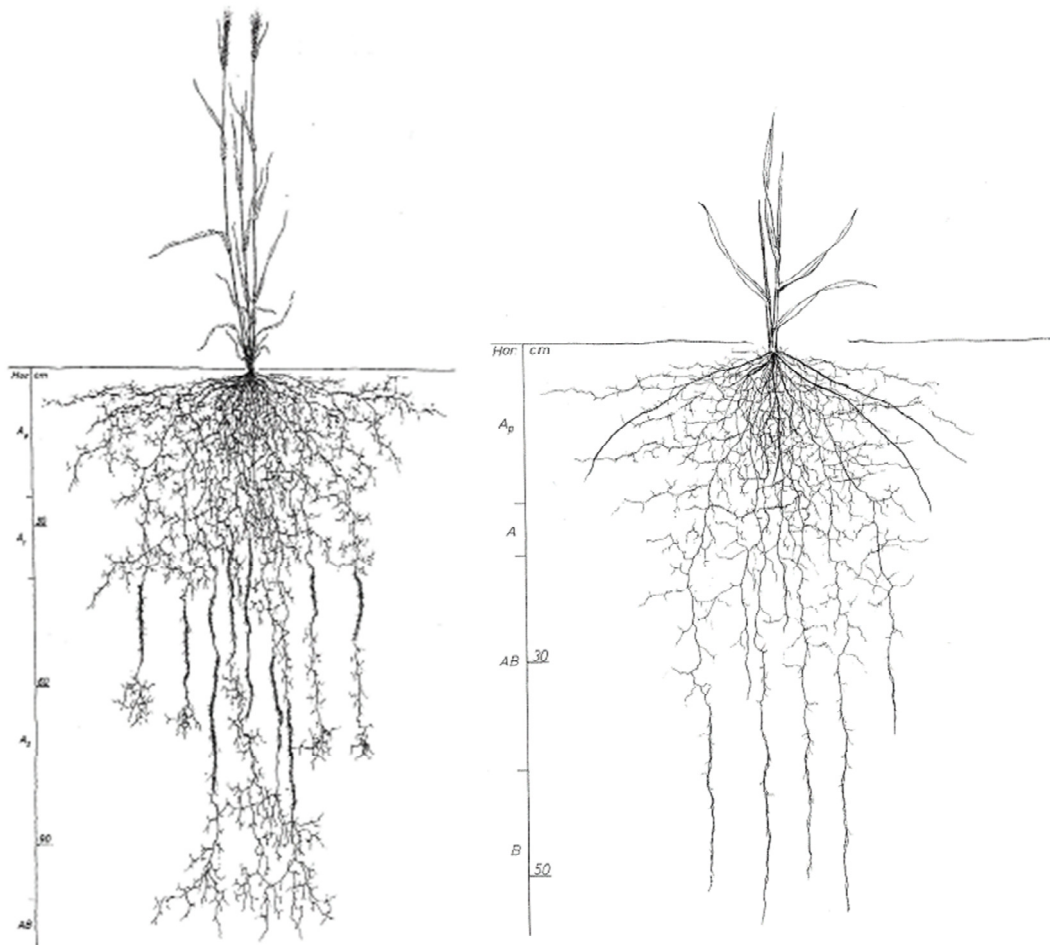
- transport en afbraak organisch materiaal
- beschikbaarheid van nutriënten vergroten door versnelling van de mineralisatie
- bodemstructuurverbetering en aggregaatvorming
- vergroten van poriënvolume, verbeteren van drainage
- verdeling van groeistimulerende organismen
- eten van wortels

In de meeste literatuur is een positief effect gevonden van regenwormen op de beworteling van gras of gras-klover (Kreuzer et al. 2004; Scheu, 2003; Hoogerkamp, 1983; Tabel 2).

Tabel 2. verloop van beworteling van grasland na introductie van regenwormen in de polder bij Biddinghuizen (Hoogerkamp, 1983)

Jaar na introductie wormen	Beworteling gras in de laag 0-15 cm (kg ds/ha)
0	570
1	570
2	750
3	1875
4	1965

Een algemeen verschijnsel is dat pendelaars (*Lumbricus terrestris*) met hun diepe verticale gangen verdichte lagen in de bodem kunnen doorbreken, en dat plantenwortels vervolgens via die gangen toegang hebben tot de laag onder de verdichting (Figuur 7, links) (Kutschera et al. 2009; pers. comm. J. Bokhorst). Eenzelfde mechanisme is waargenomen bij haverplanten waarvan de wortels de gangen van afgestorven wortels van heermoes (*Equisetum arvense*) volgen.



Figuur 7: Wortels passeren verdichte lagen door verticale gangen van regenwormen (links: gerst) en van afgestorven wortels van heermoes (rechts: jonge haverplant, onderste verticale wortels). Let op: schaal is links en rechts verschillend (Kutschera et al., 2009)

Een maatregel voor het stimuleren van de bewortelingsdiepte en het terugbrengen van bodemverdichting is het bevorderen van de aantallen en activiteit van regenwormen, vooral pendelaars.

3.2 Gewas

3.2.1 Maatregelen bij inzaai

Gerst meezaaien

Wortels gebruiken gangen van afgestorven wortels en kunnen hierdoor dieper komen (Figuur 7, rechts). Dit mechanisme wordt in bepaalde landbouwsectoren toegepast om een snellere beworteling of bedekking in de eerste fase van de gewasgroei te bereiken door het meezaaien van onder andere gerst of haver. Er zijn geen metingen bekend van het effect van deze maatregel op de wortelgroei van gras. Wel is de veronderstelling dat graswortels de gangen van de graanwortels volgen. Hier volgen enkele voorbeelden van de toepassing:

- Bij teelt voor grasdrogerijen wordt haver of Alexandrijnse klaver samen met luzerne gezaaid om sneller een gesloten zode te bereiken en onkruidgroei tegen te gaan.
- In de teelt van wortels wordt gerst meegezaaid tegen verstuing.
- Graan (haver of gerst) wordt meegezaaid als dekvruucht bij voorjaarsinzaai van gras om een snellere bodembedekking te krijgen en de wortels zorgen ervoor dat de losgemaakte bodem minder snel inzakt (pers. comm. Van Eekeren).

Wanneer deze maatregel bodemverdichting na herinzaai voorkomt of vertraagt zou het een positief effect op de wortelgroei kunnen hebben (zie 3.1). Gerst mee zaaien is dus een potentiële maatregel.

Plantdichtheid

De plantdichtheid heeft een duidelijk positieve invloed op de wortelmasa van gras (Troughton, 1956; Berendse 1981; Powell, 1977), maar niet zozeer op de bewortelingsdiepte (Powell, 1977). In een dichte zode kan voor mobiele nutriënten als nitraat wortelconcurrentie optreden, terwijl een dichte zode wel positief lijkt te werken voor een goede P-opname (zie 3.1.2).

Een potentiële maatregel voor het verbeteren van de bewortelingsdiepte door een bepaalde plantdichtheid kan hiermee dus niet worden afgeleid. Bij een uitstoelend en meerjarig gewas als grasland heeft de oorspronkelijke zaaidichtheid minder invloed op de spruitdichtheid in de jaren na het zaaien dan andere managementfactoren als maai- en beweidingsregimes (zie paragraaf 3.3).

Grassoortenmengsels en gras-klaver

In verschillende potonderzoeken wordt er geconcludeerd dat concurrentie tussen soorten leidt tot een hogere wortelmasa (Hutchings en John, 2004; Mommer et al., 2010), maar dat het de bewortelingsdiepte niet beïnvloedt (Mommer et al., 2010). In de meeste veldproeven is er geen verband gevonden tussen plantdiversiteit en wortelmasa (Troughton, 1956; Van Eekeren et al., 2010). Mogelijk heeft dit te maken met de grote variatie in het veld waardoor verschillen moeilijk meetbaar zijn.

Een potentiële maatregel voor het verbeteren van de bewortelingsdiepte door het gebruik van bepaalde grassoortenmengsels of gras-klavermengsels kan hiermee dus niet eenduidig worden afgeleid.

Zaazaadbehandeling

Uit de schaars beschikbare literatuur over de effecten van zaazaadbehandelingen op beworteling is op te maken dat het een positieve invloed kan hebben, maar meer onderzoek is nodig om dit met zekerheid vast te stellen.

- Snijmaïszaad behandeld met de Trichodermaschimmel leidde in een proef tot een uitgebreider wortelstelsel (Van der Schoot en Van Dijk, 2002).
- Graszaad gecoat met N- en P-kunstmest zorgt mogelijk voor een snellere startontwikkeling met langere en meer vertakte wortels dan ongecoat zaazaad (Hogenkamp, 2008).
- Granen waarvan het zaazaad een hittebehandeling met stoom heeft ondergaan lijken een beter ontwikkeld wortelstelsel te hebben dan onbehandeld graan (Anonymus, 2010).

Meer onderzoek zal moeten uitwijzen of zaazaadbehandeling een potentiële maatregel is.

3.2.2 Grassoorten, rassen en veredeling

Grassoorten

Er zijn veel studies gedaan naar verschillen in beworteling tussen soorten en rassen. Grassoorten uit verschillende habitats verschillen in beworteling. Grassoorten uit nutriëntrijke habitats (zoals raaigrassen en kroppaar) lijken afhankelijk te zijn van een hogere wortelproductie en wortelomzet (root turnover) voor een snelle opname van nutriënten, dan soorten uit nutriëntarme habitats (Fransen et al., 1999; Van der Krift en Berendse, 2002).

Het is reeds bekend dat rietzwenkgras dieper wortelt dan kroppaar of Engels raaigras (Deru et al., 2011; Garwood et al., 1979; Garwood en Sinclair, 1979; Tabel 3) en daardoor waarschijnlijk beter groeit in droge omstandigheden. De wortels van rietzwenkgras zijn relatief dik en taai (ook onderin het profiel) en zijn minder afhankelijk van bemesting dan Engels raaigras (Deru et al., 2011).

Het overgaan op andere grassoorten (bijvoorbeeld rietzwenkgras in plaats van Engels raaigras) is een potentiële maatregel om de bewortelingsdiepte van graslanden te vergroten.

Tabel 3. Opbrengst, wateronttrekkingsdiepte en wortelparameters van vijf grassen bij een maairequentie van zes weken (Garwood et al., 1979 en Garwood en Sinclair, 1979).

	Opbrengst boven-gronds (t ds/ha) 27 mei – 18 aug	Effectieve water- onttrekkingsdiepte (cm)	Gemiddelde WLD ³ (cm/cm ³) op 30-60 cm diepte	Gemiddelde SWL (cm/g) op 30-60 cm diepte ^{4 5}
Ruw beemdgras	0,1	40	-	-
Timotheegras	1,1	70	3,4	4,3
Kroppaar	2,0	70	2,7	3,2
Engels raaigras	2,3	80	4,9	3,6
Rietzwenkgras	3,3	>100	6,3	2,1

Veredeling

Gezien de genotypische variatie in wortelgroei binnen soorten en de belangrijke rol die de wortelarchitectuur (de verdeling in ruimte en tijd van de wortels in de bodem) speelt voor de opname van nutriënten is, wordt de wortelarchitectuur als kenmerk meegenomen in de biologische veredeling (Messmer et al., 2012). De variatie in worteldiepte tussen genotypen van dezelfde soort is relatief klein in vergelijking met de variatie tussen soorten (Messmer et al., 2012). Toch laten verschillende onderzoeken zien dat het bij gras mogelijk is om wortelkenmerken via de veredeling te beïnvloeden. Met experimenten is het gelukt om door veredeling het wortelintensiteit van raaigras in diepere bodemlagen te vergroten (Crush et al., 2010). Totaal wortelgewicht heeft een betere erfelijkheid in raaigras (Crush et al., 2006) en rietzwenkgras (Bonos et al., 2004). Onderzoek aan de hybride grassoort *Festulolium* (*Lolium perenne* x *Festuca pratensis*) laat zien dat deze hybridesoort een

³ WLD: wortellengtedichtheid = lengte wortel per volume grond [cm/cm³], een maat voor bewortelingsintensiteit

⁴ SWL= specifieke wortellengte = totale lengte / gewicht wortel [cm/gram], een maat voor worteldikte.

⁵ WLD/SWL geeft de wortelbiomassa (g/cm³) in die laag. De wortelbiomassa van rietzwenkgras is verreweg het grootst.

ander wortelstelsel heeft dan de ouderplanten. De maximum worteldiepte is kleiner (Tabel 4) en de levensduur van de wortels is korter (snellere aangroei en afvoer van wortels) (Humpreys et al., 2010).

Voor de lange termijn is de veredeling van grassoorten gericht op diepere beworteling een potentiële maatregel.

Tabel 4. Worteleigenschappen van de hybride soort Festulolium en de ouderplanten (Humpreys et al., 2010).

	L. perenne	F. pratensis	Festulolium
Maximum worteldiepte	940 mm	735 mm	604 mm
wortelsterfte	28% (hele zone)	-44% (bovenste zone)	47% (diepere zone)

Grasrassen

Ook binnen grassoorten zijn genotypische verschillen in beworteling. Zo lijken raaigrassoorten die geselecteerd zijn op een hoge N-benutting een grotere wortelgroei te hebben bij een lage N-gift dan bij een hoge N-gift. Raaigrassoorten geselecteerd op een lage N benutting reageren niet op de N-gift (Van Loo et al., 2003). Verschillende raaigras rassen laten een grote variatie zien in wortelmasse (+ of – 50% ; Ennik, 1981) en de wortelmorfologie (vertakkingen en dikte van de wortels) kan ook verschillen tussen cultivars (Macdonald et al., 2006).

Deru et al. (2012) vond een grotere wortelmasse bij diploïde Engelse raaigrasrassen dan tetraploïde rassen.

Rassenkeuze binnen grassoorten is een makkelijke maatregel om aan bewortelingsintensiteit en diepte te werken.

3.3 Management

3.3.1 Bemesting

Effect van nutriëntenvoorziening op beworteling

De nutriëntenstatus kan de ontwikkeling van de volgende wortelparameters van plantenwortels beïnvloeden (Forde en Lorenzo, 2001):

- Wortelgroei en -vertakking
- Worteldiameter
- Lengte en dichtheid van de wortelharen

De invloed van voedingstoffen op deze kenmerken wordt hieronder beschreven.

Wortelgroei en -vertakking

Verskillende onderzoeken geven aan dat N-bemesting een negatief effect heeft op de doorworteling (Frissel et al., 2005; Fairly, 1985; Ennik, 1981; Robinson et al., 1994; Goedewagen, 1954). Bij beperkende groeifactoren, waaronder weinig nutriënten als N, P of S gaat de plant investeren in het wortelstelsel waardoor de wortel-spruitverhouding toeneemt (Davidson, 1969a; Forde en Lorenzo, 2001; Kuzyakov, 2002; Troughton, 1956; Boot en Mensink, 1990). Het is algemeen bekend dat en dit effect sterker is bij (gras)soorten die aangepast zijn aan een hoge bodemvruchtbaarheid (Van Loo et al., 2003).

Onderling verschillen grassoorten in de manier waarop zij op bemesting reageren (Deru et al., 2011):

- Bij een hoge N bemesting concentreert de beworteling van Engels raaigras zich verder in de bovenste 8 cm ten koste van de diepere beworteling.
- Rietzwenkgras laat juist een betere beworteling zien in de laag van 24-32 cm.
- Kroppaar zit daar tussenin.

Voor K is geen effect gevonden op de beworteling (Goedewagen, 1954; Drew, 1975).

Een verhoogde P-beschikbaarheid in de bovenlaag bevorderde de algehele beworteling (zie paragraaf 2.1). Bij een hoge P-toestand neemt de wortelmassa relatief af, omdat de bovengrondse groei sterker toeneemt.

Naast een algemene negatieve invloed van de aanwezigheid van voedingsstoffen op de beworteling, kan pleksgewijze toediening tot een sterke plaatselijke wortelgroei en -vertakking leiden (Robinson et al., 1994).

Een potentiële maatregel voor het verbeteren van de bewortelingsdiepte is het verlagen van de N bemesting (al dan niet in combinatie met het gebruik van andere grassoorten).

Worteldiameter

Maatregelen die de beworteling bevorderen hebben ook invloed op de dikte van de wortels. Daarnaast is de worteldikte soortafhankelijk (Tabel 3). Uit verschillende onderzoeken is gebleken dat bij grassen dunnere wortels ontwikkelen bij deficiënte nutriëntenomstandigheden (Fitter, 1985; Kutschera, 2009). Wat het effect hiervan is op de droogtetolerantie is niet geheel duidelijk en moet nog verder worden onderzocht.

Lengte en dichtheid van de wortelharen

Wortelharen spelen een belangrijke rol voor de opname van nutriënten. Wortelharen vergroten het worteloppervlak, waarmee opname kan plaatsvinden door hun kleine diameter. Zowel de lengte van wortelharen als de dichtheid op de worteloppervlak kunnen beïnvloed worden door de nutriëntenstatus (Figuur 10). Over het algemeen wordt bij planten een toename van wortelharen gevonden bij P- en N-tekort. Bij grassen lijkt de groei van wortelharen echter niet gevoelig te zijn voor N in de vorm van nitraat (Forde en Lorenzo, 2001). Soorten afkomstig uit nutriëntarme omstandigheden ontwikkelen langere en meer wortelharen (Boot en Mensink, 1990).

Het verlagen van de stikstofgift is een potentiële maatregel die ervoor kan zorgen dat grassen het worteloppervlak vergroten en minder snel verdrogen.

Tijdstip van stikstofbemesting na maaien

Verschillende onderzoeken geven indicaties dat het uitstellen van stikstofbemesting de beworteling stimuleert (Ennik 1981; Jarvis en Macduff, 1989; Van Eekeren et al., 2009; Sheldrick et al., 1994). Een mogelijke maatregel voor het stimuleren van de beworteling zou kunnen zijn om de bemesting (stikstofgift) na het maaien met 7-10 dagen uit te stellen.

Stikstoftoediening onder het maaiveld

Het injecteren van vloeibare stikstofbemesting (waarbij N dieper en lokaal geconcentreerd toegediend wordt) zou kunnen leiden tot meer wortelmasse en een diepere beworteling vergeleken met oppervlakkige toediening (Laine et al., 1998; Murphy en Zaurov, 1994).

Een mogelijke bemestingsmaatregel zou kunnen zijn om de kunstmest in vloeibare vorm onder de zode (5 cm diepte) toe te dienen.

Toediening van humuszuren

De toediening van humuszuren lijkt een positief effect te hebben op wortellengte en opname van nutriënten (Verlinden et al. 2010; Cooper et al., 1998).

3.3.2 Maaien en beweiden

Resultaten van een langlopend onderzoek naar de doorworteling van dijkgraslanden laat zien dat beweiden met schapen vooral een positief effect op de doorworteling in de bovenste bodemlagen en hooibeheer op de doorworteling op de diepere bodemlagen (Frissel et al., 2005).

Beweiding en berijding van grasland kunnen onder natte omstandigheden negatieve gevolgen hebben voor de bodemstructuur waardoor een goede beworteling geremd wordt (zie paragraaf 3.1). De beworteling wordt naast deze fysieke ingreep ook sterk beïnvloed door fysiologische veranderingen in de plant na het maaien of grazen.

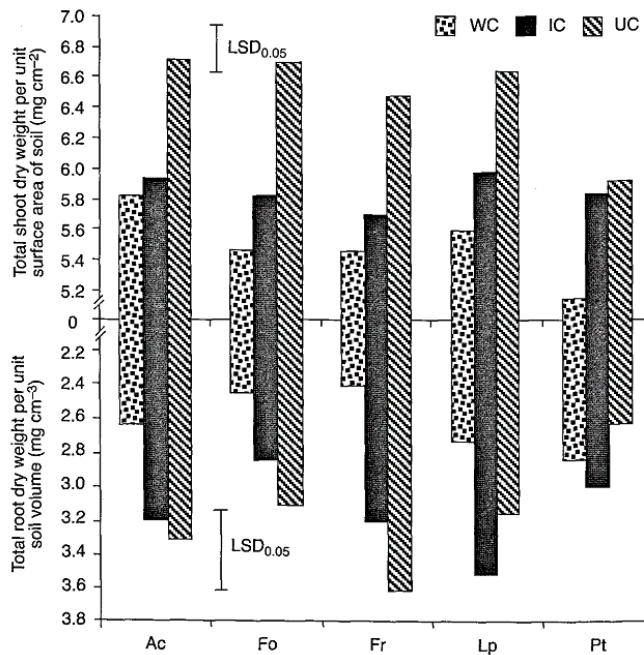
Wortelreserves en hergroei na maaien / grazen

In de inleiding van dit hoofdstuk is kort beschreven hoe grassen aangepast zijn door de manier van reserveopbouw in de wortels en hergroei na begrazing. De mobilisatie van suikers en aminozuren uit de wortels en stoppels speelt daarbij een belangrijke rol (Ourry et al., 1989; Sullivan en Sprague, 1949).

Het effect van management, zoals de frequentie van maaien of weiden, op de beworteling hangt sterk af van de aanspraak die dat management doet op wortelreserves en de mogelijkheid om wortelreserves weer te herstellen. Bij een te hoge maaifrequentie neemt de beworteling af (Schuurmans, 1954; Ennik, 1981). Veel onderzoek bevestigt dat zowel wortelmasse als wortellengte en -groei bij gras geremd worden door het verwijderen van de bovengrondse delen (Dawson, 2000; Dawson et al., 2003; Evans, 1971 en 1972; Jarvis en Macduff, 1989; Macdonald et al. 2006; Mackie-Dawson, 1999).

Figuur geeft duidelijk weer dat vaker maaien in het algemeen een negatief effect heeft op de bovengrondse opbrengst en beworteling. Engels raaigras en ruw beemdgras hebben een optimum voor de beworteling bij 8 weken maaien.

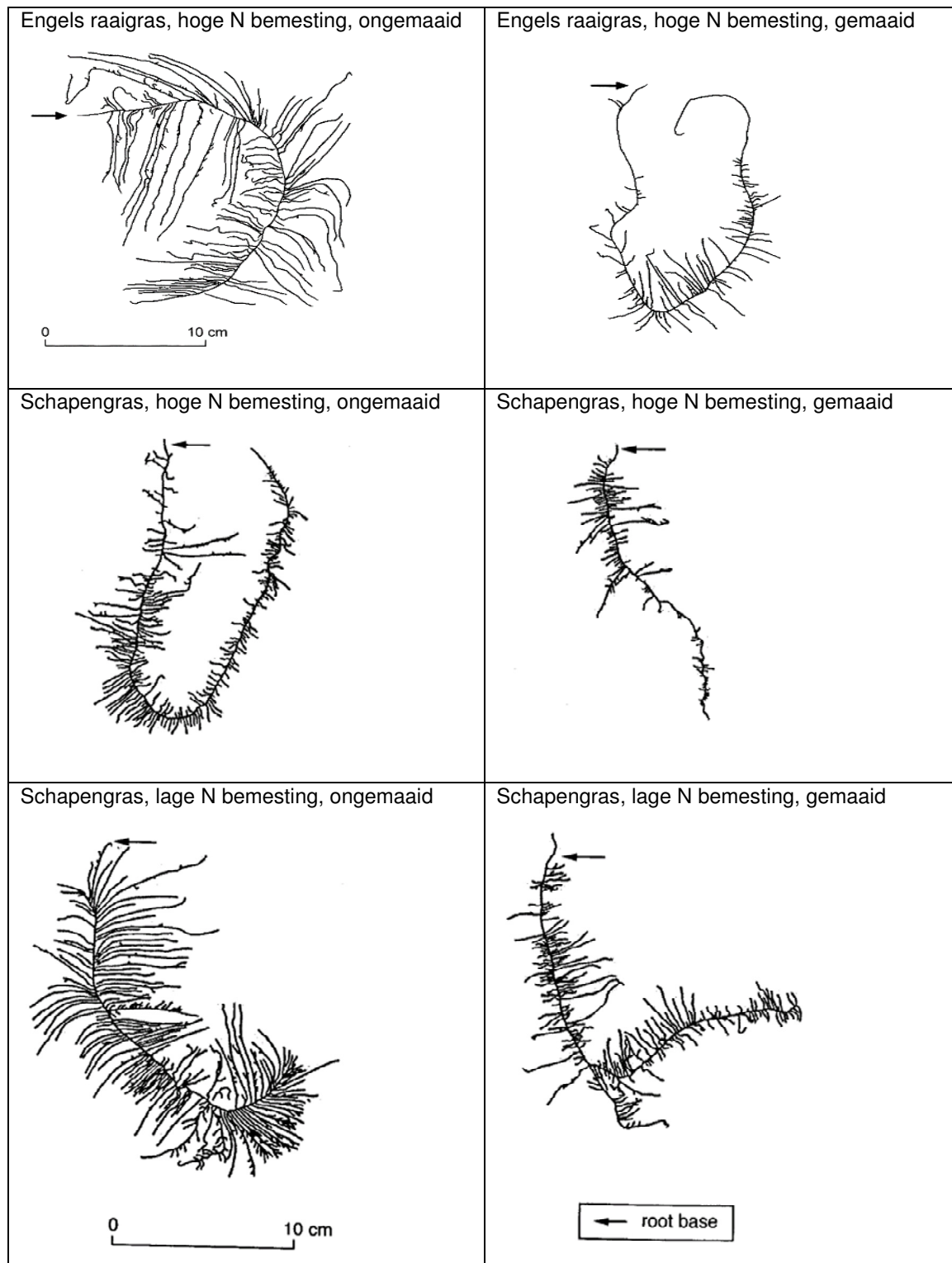
Kort en frequent maaien heeft over het algemeen tijdelijk een lagere wortelgroei tot gevolg (Evans, 1971). Er lijkt wel een optimum te zijn in de combinatie van maai frequentie en maaihoogte (~ veebezetting versus beweidingssysteem). Wanneer maaien tot een hogere spruit- en plantdichtheid in de zode leidt, kan dit over een heel seizoen de wortelgroei positief beïnvloeden.



Figuur 8. Bovengrondse biomassa (mg/cm²) en wortelbiomassa (mg/cm³) bij vijf grassoorten. De planten zijn na zaai gedurende één jaar wekelijks gemaaid (WC), gemaaid om de 8 weken (IC) en niet gemaaid (UC). Uit: Dawson (2000)

- Ac: *Agrostis capillaris* (gewoon struisgras)
- Fo: *Festuca ovina* (schapengras)
- Fr: *Festuca rubra* (roodzwenkgras)
- Lp: *Lolium perenne* (Engels raaigras)
- Pt: *Poa trivialis* (ruw beemdgras)

Minder frequent maaien, dus zwaardere snedes oogsten (maar niet te kort), zou hierdoor een maatregel kunnen zijn om een diepere wortelgroei te bereiken.



Figuur 9. Effect van maaien en N bemesting op wortelhaarlengte.

Effect van N-niveau en grassoort

Naast de algemene trend dat beweiden of maaien een aanslag is op de wortelgroei, wijzen meerdere auteurs op verschillen in reacties tussen grassoorten, genotypes en bij verschillende bemestingsniveaus (Mackie-Dawson, 1999; Macdonald et al., 2006; Dawson, 2000; Dawson et al., 2003; Arredondo en Johnson, 1999).

- Raaigras: Over het algemeen is er door maaien een vermindering van wortelgroei.
 - Volgens Mackie-Dawson (1999) bestaat dit verband onder alle N-bemestingsniveaus
 - Volgens Macdonald et al. (2006) is er alleen verminderde wortelgroei wanneer er geen N-bemesting wordt gegeven
 - Volgens Dawson (2000) en Dawson et al. (2003) reageert raaigras sterker op begrazing bij een hoog N-niveau dan bij een laag N-niveau door meer te vertakkingen te vormen.
- Schapengras: Vertoont grote wortelplasticiteit bij laag N niveau, dus geen verminderde wortelgroei door begrazing (Dawson, 2000; Dawson et al., 2003).
- Rietzwenkgras: Geen verband aangetoond tussen maai-interval en wortellengte (Beyrouy et al., 1990).

Naast verschillen tussen soorten zijn ook tegenovergestelde reacties op maaifrequentie bij verschillende genotypes van eenzelfde soort gemeten (Dawson, 2000).

Een potentiële maatregel is hieruit moeilijk af te leiden.

Beweidingsstelsel en beworteling

Standweiden kan tot een hogere wortelmassa leiden dan omweiden, wanneer de optimale veebezetting niet wordt overschreden (Deinum, 1985). Bij standweiden wordt het gras op een constante lengte gehouden waardoor de fotosynthese ook relatief constant blijft. Er hoeft dan minder aanspraak te worden gemaakt op wortelreserves voor het opnieuw uitschieten van het gras, zoals bij omweiden het geval is.

Hier komt nog bij dat bij standweiden het gras minder kans krijgt om stengel en zaad te schieten waardoor er minder aanspraak wordt gemaakt op wortelreserves. Gras zal bij stengel- en aarvorming alle energie investeren in de zaadvorming (Parsons, 1981) wat ten koste gaat van het wortelstelsel (Troughton, 1978b).

Wanneer de veebezetting te hoog is en het bladoppervlakte te klein, kan standweiden de groei van de wortels juist tegenwerken. Het bladoppervlak is dan niet groot genoeg om zonder wortelreserves uit te schieten. Hiermee kunnen wortelreserves worden uitgeput (Deinum, 1985).

Voor het benoemen van een maatregel voor toename van wortelgroei zou eerst het optimum gevonden moeten worden tussen beweidingsstelsel (~ maaifrequentie) en veebezetting (~ maaihoogte).

3.3.3 Leeftijd grasland, grondbewerking en vruchtwisseling

Verschillende bronnen geven aan dat oude graslanden over het algemeen een oppervlakkiger beworteling hebben dan jong grasland (pers. comm. J. Visscher; Van Eekeren et al., 2008). Zoals in de vorige paragrafen is besproken heeft management een groot effect op de beworteling en dit zal uiteraard sterk verschillen tussen oude en jonge graslanden. Harde uitspraken over de maatregel graslandvernieuwing kunnen hier daarom niet worden gedaan. Temeer omdat graslandvernieuwing leidt tot een sterke verhoging van de nitraatgehalte in de bodem, hetgeen afhankelijk van tijdstip, bodemsoort, neerslag etc. tot uitspoeling kan leiden (Hoving en Velthof, 2006). Daarnaast heeft het een negatieve invloed op het bodemleven, waaronder de hoeveelheid regenwormen (Van Eekeren et al., 2008). Onderzoek zou zich daarom meer moeten richten op het behoud en het bevorderen van een diepe en intensieve beworteling bij blijvend grasland dan om dat te bereiken door graslandvernieuwing.

3.4 Overige factoren

3.4.1 Vochtvoorziening

Sinds de jaren '60 is een aantal studies gedaan waarin het effect van verschillende vochttoestanden van de bodem op de wortelgroei van grassen werd onderzocht.

Over het algemeen kan er worden geconcludeerd dat droogte een negatief effect op de beworteling (Troughton, 1978a). Beregening zorgt na droogte voor een snelle groei van wortels (Troughton, 1980), maar frequente beregening helpt niet. De behandeling waar maar één maal per seizoen was beregend had de grootste ondergrondse biomassa en de diepste beworteling. Dit komt overeen met het feit dat bij frequente en oppervlakkige beregening de wortels boven in het profiel blijven, terwijl wanneer het hele bodemprofiel vochtig is de wortels gestimuleerd worden om dieper te groeien (Appadurai en Holmes, 1964).

De literatuur is niet eenduidig over droogtetolerantie en wortel-spruitverhouding. Waarschijnlijk heeft dit te maken met het feit dat vochtvoorziening veel invloed heeft op de beschikbaarheid van nutriënten, in het bijzonder van fosfaat. Wanneer P niet beperkend is en de plant ondanks droogte toch genoeg fosfaat kan opnemen, dan kan de bovengrondse groei zich beter doorzetten dan de wortelgroei. Onder een situatie van P-tekort heeft droogte echter zoveel effect op de P-opname dat de bovengrondse groei achterblijft (Powell, 1977) en netto een verhoging van de wortel-spruitverhouding kan optreden (Gales, 1979).

De vochtvoorziening is een belangrijke factor voor wortelgroei. Droogte, zeker in combinatie met P-tekort, werkt negatief op de wortelgroei. Wanneer er beregend moet worden is het beter voor de wortelontwikkeling om minder vaak en langer achter elkaar te beregenen.

3.4.2 Lichtintensiteit en temperatuur

Onderhoud van het wortelstelsel kost energie. Gras dat bijvoorbeeld in de schaduw groeit probeert meer bladoppervlak te vormen om meer zonlicht op te vangen. Dit gaat ten koste van wortelenergie.

Onderzoek in Nieuw-Zeeland wees uit dat bij beschaduwden van Engels raaigras de wortels langer en dunner worden (hogere SWL). De wortellengtegroei nam na beschaduwden tijdens de opvolgende 10 dagen af, maar nam vervolgens weer toe en bereikte rond dag 20 het niveau van vóór de start van het beschaduwden (Evans, 1971). De effecten waren sterker wanneer meer werd beschaduwd.

Naast lichtintensiteit zijn bodem- en luchttemperatuur belangrijk voor een goede gras- en wortelgroei. Opwarmen van de bodem in het voorjaar gaat sneller wanneer de grond minder water en meer humus en lucht bevat. Davidson (1969b) bestudeerde het effect van bodemtemperatuur op de wortel-spruitverhouding van verschillende grassoorten. Bij de temperatuur met de hoogste bovengrondse opbrengst (ca. 20°C voor soorten als Engels raaigras) was de wortel-spruitverhouding het laagst. Bij temperaturen daaronder en daarboven steeg de verhouding.

3.5 Samenvattend overzicht factoren en maatregelen die de beworteling beïnvloeden

Tabel 5 geeft een overzicht van de factoren en potentiële maatregelen om de droogtetolerantie van graslanden te vergroten. In de tabel wordt ook het (mogelijk) achterliggende mechanisme beschreven. Tabel 6 is een Engelse vertaling.

Tabel 5: Factoren en potentiële maatregelen voor het vergroten van de droogtetolerantie van grasland

Categorie	Hoofdfactor	Deelfactor (en effect op beworteling)	Mechanisme	Potentiële maatregel of denkrichting voor maatregel
Bodem	Fysische toestand	<ul style="list-style-type: none"> – bodemverdichting (-) – diepte zwarte laag / organische stof (+) 	<ul style="list-style-type: none"> – fysieke hinder; teveel vocht en luchttekort – lagere indringingsweerstand; gunstige bodemstructuur; nutriëntenlevering via wortellexudaten; gunstige vochthuishouding 	<ul style="list-style-type: none"> – voorkomen vertrapping en structuurschade – op peil houden van organisch stof gehalte
	Chemische toestand	<ul style="list-style-type: none"> – pH (zure grond: -) – P-toestand (- en +) 	<ul style="list-style-type: none"> – beschikbaarheid Ca en Mg – zowel verhoging als verlaging van het wortelaandeel gevonden bij lagere P-toestand; effect sterk afhankelijk van interactie met andere groeifactoren (N, vocht) 	<ul style="list-style-type: none"> – pH op peil houden
	Bodem-biologisch	<ul style="list-style-type: none"> – regenwormen (+) 	<ul style="list-style-type: none"> – doorwortelbare gangen; nutriëntenlevering 	<ul style="list-style-type: none"> – bevorderen van regenwormen (aantallen en activiteit)
Gewas	Maatregelen bij inzaai	<ul style="list-style-type: none"> – gerst meezaaien (+ ?) – zaadbehandeling (+) – zaaidichtheid (+?) – soorten mengsels (+) 	<ul style="list-style-type: none"> – doorwortelbare gangen, voorkomen bodemverdichting – bemesting, wortelziektepreventie – concurrentie voor nutriënten en vocht – concurrentie voor nutriënten en vocht 	<ul style="list-style-type: none"> – snelgroeiend / diepwortelend gewas als dekvrucht gebruiken – hogere zaaidichtheid (?) – grassoortenmengsels, gras-klaver/kruiden
	Rassen en veredeling	<ul style="list-style-type: none"> – rassen en soorten – veredeling 	<ul style="list-style-type: none"> – genotypische verschillen – veredeling op beworteling mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> – grasrassen en -soorten kiezen met een diepe en intensieve beworteling
Management	Bemesting	<ul style="list-style-type: none"> – Algemeen: (-) – N: (-) P: (-/+) K: (0) – humuszuren (+) 	<p>Algemeen:</p> <ul style="list-style-type: none"> – tekort geeft een hoger wortel-spruit-verhouding maar lagere wortelbiomassa – effect op wortelgroei en -vertakking, worteldiameter en wortelharen – humuszuren: verhoogde wortellengte, betere P opname 	<ul style="list-style-type: none"> – algemeen: N-niveau verlagen – uitstel van N-gift na maaien – N-gift toediening onder het maaiveld – toediening humuszuren in de bodem vóór het zaaien
	Maaien en beweiden	<ul style="list-style-type: none"> – maaihoogte (-/+) – maairequentie (-/+) – beweidingssysteem (omweiden versus standweiden) 	<ul style="list-style-type: none"> – fysiek: verdichting bodem door machines en vertrapping door vee – fysiologisch: fotosyntheseactiviteit, verdeling van suikers – effect op spruitdichtheid – interactie met bemesting, grasoort – evenwicht tussen fotosynthese, bovengrondse groei, wortelgroei, aanspraak op reserves, nutriënt- en vochtopname bepaalt effect. – korte termijn effect van maaien is negatief, maar wanneer de spruitdichtheid toeneemt neemt de beworteling van de zode toe 	<ul style="list-style-type: none"> – hoger maaien (~ lagere veebezetting) – minder frequent maaien (~ minder frequent beweiden)

Vervolg Tabel 5.

Leeftijd grasland	<ul style="list-style-type: none"> - leeftijd grasland (-) - grondbewerking (-/+) (scheuren en herinzaai) 	<ul style="list-style-type: none"> - verdichting? Verdeling organische stof? - verdichting (-) / beluchting (+); verdeling organische stof (-/+); bodemleven (-) 	<ul style="list-style-type: none"> - grasland vernieuwen (?)
Overige factoren	<ul style="list-style-type: none"> - vochtvoorziening (-/+) - lichtintensiteit (-/+) - bodemtemperatuur 	<ul style="list-style-type: none"> - effect sterk afhankelijk van interactie met nutriëntenbeschikbaarheid. - verschillen tussen grassoorten. - fotosyntheseactiviteit, dunnere wortels - wortel-spruitverhouding het hoogst buiten het temperatuuroptimum voor bovengrondse groei. 	<ul style="list-style-type: none"> - beregenen: minder vaak maar langer achter elkaar. - voorkomen droogtestress

Table 6: Factors and (potential) management measures to improve drought tolerance of grassland.

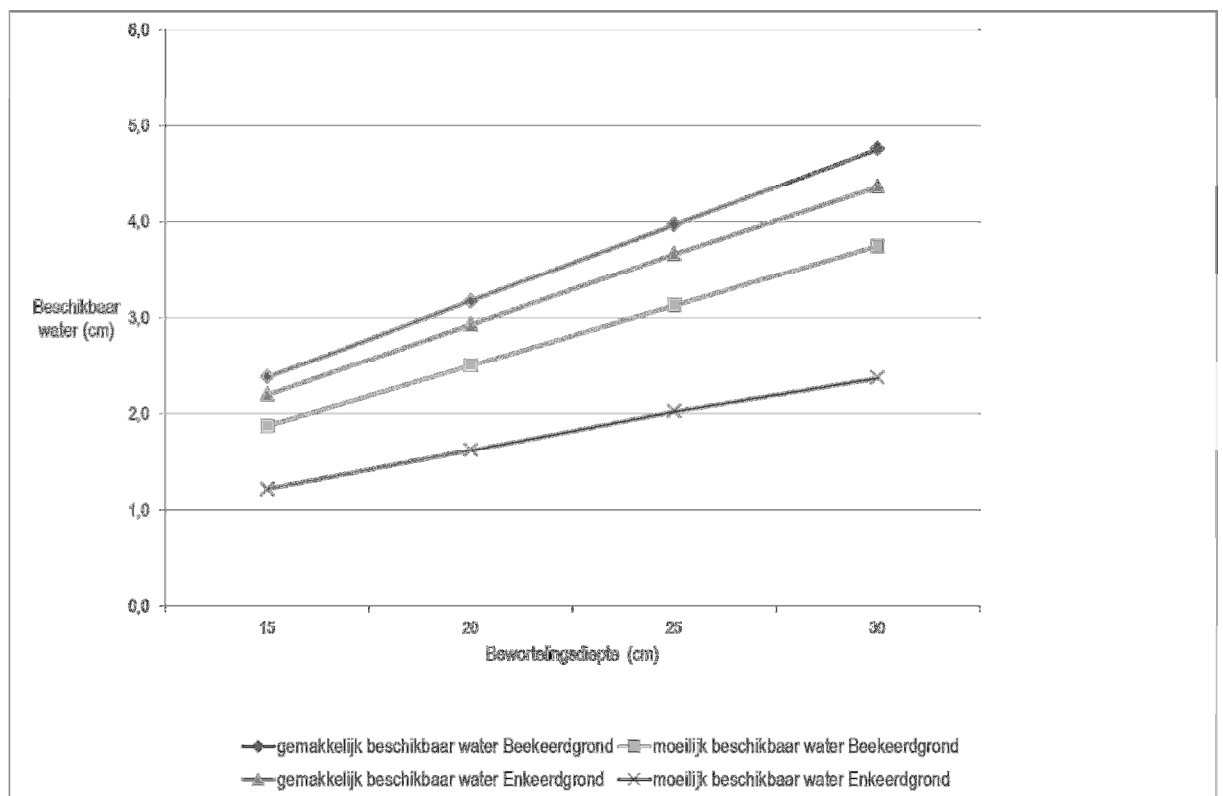
Category	Main factor	Sub factor (and effect on rooting)	Mechanism	Potential management measure
Soil	Physical condition	<ul style="list-style-type: none"> – Soil compaction (–) – Depth of the upper dark layer / organic matter content (+) 	<ul style="list-style-type: none"> – Higher penetration resistance; water logging and aeration problems – Lower penetration resistance; favourable soil structure; nutrient delivery (priming effects); favourable soil hydrology 	<ul style="list-style-type: none"> – Prevent trampling by cattle and other damage to soil structure
	Chemical condition	<ul style="list-style-type: none"> – pH (low soil pH (–)) – P level (– and +) 	<ul style="list-style-type: none"> – Effect on Ca and Mg availability – Lower P levels may lead to either increased or decreased root biomass, the effect depending strongly on interactions with other growth factors (N, water content) 	<ul style="list-style-type: none"> – Maintain optimum soil pH
	Soil biology	<ul style="list-style-type: none"> – Earthworms (+) 	<ul style="list-style-type: none"> – Root growth into earthworms burrows; increased nutrient supply 	<ul style="list-style-type: none"> – Promote earthworm numbers and activity (management measures to be developed)
Crop	Measures at sowing	<ul style="list-style-type: none"> – Include barley (+?) – Seed treatment (+) – Sowing density (+?) – Species mixtures (+) 	<ul style="list-style-type: none"> – Root growth into (old) barley root channels; barley increases macro-porosity and prevents soil compaction – Adding fertilizer; prevention of root diseases – Competition for nutrients and water – Competition for nutrients and water 	<ul style="list-style-type: none"> – Use a fast-growing/deep-rooting crop (such as barley) during establishment of grassland – Higher sowing density (?) – Use grass species mixtures, or grass-clover/herbs mixtures
	Varieties and plant breeding	<ul style="list-style-type: none"> – Varieties and species – Plant breeding 	<ul style="list-style-type: none"> – Genotypic differences – Breeding for root characteristics is possible 	<ul style="list-style-type: none"> – Select grass species and varieties with deep and dense root systems
Management	Soil fertilization	<ul style="list-style-type: none"> – General: (–) – N: (–) P: (–/+) K: (0) – Humic acids (+) 	<p>General:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Nutrient deficiencies lead to a higher root:shoot ratio, but a lower root biomass – Effect on root growth, root branching, root diameter and root hairs – Humic acids: increased root length density and P uptake 	<ul style="list-style-type: none"> – General: Lower N-levels – Delay N fertilization until after mowing – Apply N belowground rather than to the surface – Incorporation of humic acids in the soil prior to seeding
	Mowing and grazing regime	<ul style="list-style-type: none"> – Mowing height (–/+) – Mowing frequency (–/+) – Grazing system (rotational versus continuous grazing) 	<ul style="list-style-type: none"> – Soil structure: compaction through mowing equipment and trampling – Plant physiology: photosynthesis rate, assimilate distribution – Effect on seedling density – Interaction with fertilizer effects, grass species – Effect depends on the balance between photosynthesis, shoot and root growth, nutrient and water uptake, and the use of reserves – Short-term effect of mowing is negative, but root density in the sod increases with seedling density 	<ul style="list-style-type: none"> – Increase mowing height (~ lower stocking rate) – Reduce mowing frequency (~ reduce grazing frequency)
	Grassland age	<ul style="list-style-type: none"> – Grassland age (–) – Soil tillage (–/+) (breaking up the sod and re-seeding) 	<ul style="list-style-type: none"> – Soil compaction? Soil organic matter distribution? – Compaction (–) / aeration (+); organic matter distribution (–/+) ; soil biota (–) 	<ul style="list-style-type: none"> – Renew grassland (?)

Table 6 continuing

Other factors	<ul style="list-style-type: none"> - Soil moisture supply (-/+) - Light intensity (-/+) - Soil temperature 	<ul style="list-style-type: none"> - Effect strongly depends on interaction with nutrient availability - Different responses between grass species - Photosynthesis rate, thinner roots - The root:shoot ratio is highest outside the optimum temperature range for shoot growth 	<ul style="list-style-type: none"> - Irrigation: less frequent, but longer run times - Prevent drought stress
---------------	---	--	---

4 Scenario's worteldiepte

In Wösten (2012) is de hoeveelheid beschikbaar water gemodelleerd voor scenario's op vier bewortelingsdieptes (15, 20, 25 en 30 cm) en twee dominante bodemtypes van de veldmetingen; grasland op een beekeerd- en een enkeerdgrond. De uitkomsten zijn uitgewerkt en samengevat in Figuur 10. Deze scenario's geven inzicht over het effect van een diepere beworteling en het voor de plant beschikbare water. Het is helaas (nog) niet mogelijk om het effect van alle maatregelen (apart en gestapeld) op de bewortelingsdiepte en de gekoppelde bovengrondse opbrengst te kwantificeren. Uit Figuur 10 is op te maken dat graslanden op beekeerdgronden een grotere droogtetolerantie hebben dan grasland op enkeerdgronden. Dit komt door de fysische en chemische samenstelling van de bodem. Voor beide bodemtypes geldt dat de hoeveelheid beschikbaar water in de wortelzone rechtlijnig toeneemt met de bewortelingsdiepte (Wösten, 2012). Praktisch betekent dit dat als de bewortelingsdiepte toeneemt van 15 naar 25 cm, de waterbeschikbaarheid op een beekeerdgrond toeneemt met 1,6 cm en op een enkeerdgrond met 1,5 cm, een toename van het gemakkelijk beschikbare water tussen de 65-70%. Een verbeterde ondergrondse ontwikkeling zal resulteren in een verbeterde bovengrondse grasopbrengst.



Figuur 10. Beschikbaar water in de wortelzone uitgezet tegen de bewortelingsdiepte van grasland in 2 scenario's: beekeerd- en enkeerdgrond (Wösten, 2012).

5 Discussie en conclusie

In deze literatuurstudie is gebruik gemaakt van korte en langlopende onderzoeken om de factoren die de beworteling van graslanden beïnvloeden. De nadruk heeft gelegen op de bewortelingsdiepte, omdat deze sterk gecorreleerd is aan de droogtetolerantie van graslanden (Figuur 10). Op basis van de literatuur zijn er potentiële maatregelen die in de agrarische praktijk kunnen worden getest.

5.1 Maatregelen voor droogtetolerantie van grasland

Binnen de kaders die beworteling fysiek aan de bodem stelt is het mogelijk om grasland dieper en intensiever te laten bewortelen als gevolg van management. Maatregelen bij de inzaai, aangepaste bemesting, maai- en beweidingstrategieën zijn de belangrijkste instrumenten hiervoor. Uit de literatuur is gebleken dat er van sommige maatregelen een duidelijk effect verwacht kan worden, terwijl dat voor sommige niet eenduidig te zeggen is. De meest veelbelovende maatregelen voor de praktijk om de bewortelingsdiepte te vergroten zijn:

- Voorkomen van vertrapping, structuurschade, en werken aan de herstelcapaciteit van de bodem
 - Verhogen organische stof
 - pH op peil houden
 - Bevorderen van aantallen en activiteit van regenwormen, vooral pendelaars
- Bij inzaai
 - Snelgroeïende diepwortelende gewassen als dekvrucht gebruiken (bijvoorbeeld gerst)
 - Grassoorten kiezen met een diepe en intensieve beworteling zoals bijv. Rietzwenkgras
 - Grasrassen kiezen met een diepe en intensieve beworteling zoals bijvoorbeeld diploïde Engelse raaigrassen
- Via bemesting
 - N-niveau verlagen
 - Uitstel van N-gift na maaien
 - N-gift toediening onder het maaiveld
- Maaien en beweiden
 - Hoger maaien (~ lagere veebezetting)
 - Minder frequent maaien (~ minder frequent beweiden)

5.2 Scenario's

In de scenario's is gekeken naar vier bewortelingsdieptes op twee bodemtypes (enkeerd- en een bekeerdgrond).. De scenario's geven aan dat diepere beworteling belangrijk is om de droogtetolerantie te vergroten. Het is helaas (nog) niet mogelijk om de effecten van de potentiële maatregelen op de worteldiepte van grasland te kwantificeren. Dit heeft te maken met het feit dat elke maatregel een combinatie van effecten geeft op de beworteling, bodem, gewas, mineralen en waterbeschikbaarheid, factoren die elkaar onderling beïnvloeden.

5.3 *Betekenis voor de agrarische praktijk*

Voor de agrarische praktijk zal klimaatadaptatie betekenen dat er in eerste instantie niet naar bovengrondse opbrengst moet worden gekeken, maar dat de effecten van management op de ondergrondse ontwikkeling van graslanden belangrijk zijn om periodes van droogte te kunnen overbruggen.

Dit onderzoek laat zien dat er een breed scala aan maatregelen beschikbaar is: van bodem, tot bemesting en inzaai. Sommige maatregelen zullen pas op de langere termijn werken, maar ook op de korte termijn liggen er mogelijkheden. Veehouders zouden vanaf vandaag rekening kunnen houden met beworteling door bijvoorbeeld de mengselkeuze aan te passen.

Om de bovengenoemde management maatregelen in de praktijk te toetsen op inpasbaarheid zal er op experimentele basis samengewerkt moeten worden met boeren. Daarnaast zal er aan bewustwording en kennisoverdracht moeten worden gewerkt, zodat veehouders beseffen welke mogelijkheden zij hebben om de droogtetolerantie van hun grasland te vergroten.

Tijdens eerdere fases van dit onderzoeksproject is samengewerkt met agrariërs (Faber et al., 2012). De bemonstering heeft plaatsgevonden op 20 bedrijven in de Gelderse Vallei die al actief bezig zijn met bodemvruchtbaarheid en droogtetolerantie van grasland. Om een deze gedragsverandering verder uit te rollen zodat meer agrariërs maatregelen voor een betere droogtetolerantie, zijn verschillende wegen mogelijk. Hier volgen enkele voorbeelden:

- Het verkrijgen van een vergunning voor beregening koppelen aan maatregelen voor het vergroten van de droogtetolerantie: een soort “voor wat hoort wat principe”. Ook het waterschap zou hier betrokken kunnen worden in het uitwerken van zo'n raamwerk. In de zuidelijke provincies wordt er reeds gewerkt aan een dergelijk raamwerk door de ZLTO en betrokken partners.
- Het opnemen van deze maatregelen in een demoregeling (à la Bloeiend Bedrijf, zie www.bloeiendbedrijf.nl). Een demoregeling heeft als voordeel dat er veel praktijkkennis wordt opgedaan en dat agrariërs een vergoeding krijgen voor hun inzet. Dit zorgt voor een actieve deelname en een veel uitwisseling van ervaringen.
- In het kader van de herziening van het Gemeenschappelijke Landbouw Beleid (GLB) kunnen bepaalde maatregelen ook deel gaan uitmaken van de blauw-groene diensten. Bijvoorbeeld het werken met graslandmengsels is een maatregel voor een grotere droogtetolerantie, en tegelijkertijd een grotere biodiversiteit.

5.4 *Betekenis voor modelleren van waterbalansen*

Met een betere beworteling van graslanden hoeft er minder beregend te worden omdat de plant een groter bereik heeft en het beschikbare water in de wortelzone is vergroot. Naast een groter bereik kan een goed doorwortelde bodem vocht leveren aan de plant. Door de voortdurende opbouw en afbraak van wortels zal op de lange termijn ook het organisch stof gehalte toenemen, waardoor het bodemleven gestimuleerd wordt. Beide hebben een bufferende werking tijdens periodes aan droogte of juist pieken in de regenval.

De voorgestelde maatregelen hebben als consequentie dat het modelleren van waterbalansen in graslanden uitgebreid wordt naar bewortelingsdieptes die verder gaan dan 30 cm. Daarnaast is het interessant om te kijken hoe grassoorten die dieper wortelen en een grotere droogtetolerantie hebben (bijvoorbeeld rietzwenkgras in plaats van Engels raaigras) invloed hebben op de waterbalans.

Referenties

- Anonymus (2010). Het hoogste voersaldo per koe / Thermoseed in biologische graanteelt. In: Ekoland, januari 2010.
- Appadurai R.P., Holmes W. (1964) The influence of stage of growth, closeness of defoliation, and moisture on growth and productivity of a ryegrass-white clover sward. 1. Effect on herbage yield. *J. Agric. Sci.* 62: 327-332.
- Arredondo J.T., Johnson D.A. (1999) Root architecture and biomass allocation of three range grasses in response to nonuniform supply of nutrients and shoot defoliation. *New. Phytol.* 143: 373-385.
- Berendse (1981) Competition between plant populations with different rooting depths. II. Pot experiments. *Oecologia* 48: 334-341.
- Beyrouy C.A., West C.P., Gbur E.E. (1990) Root development of bermudagrass and tall fescue as affected by cutting interval and growth regulators. *Plant and Soil*, 127: 23-30.
- Bingham S., Lee E., Rex Lee J. en the Rock Point Range Management Project (1984). Living from livestock: Range management and ranch planning for Navajo Country.
- Bonos S.A., Rush D., Hignight K., Meyer W.A. (2004) Selection for deep root production in tall fescue and perennial Ryegrass. *Crop Science* 44:1770-1775.
- Boot, R.G.A. en Mensink, M. (1990). Size and morphology of root systems of perennial grasses from contrasting habitats as affected by nitrogen supply. *Plant and Soil* 129: 291-299.
- Canadell J., Jackson R.B, Ehleringer J.R. (1996) Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108: 583-595.
- Cooper R.J., Chunhua Liu, Fisher D.S (1998) Influence of Humic Substances on Rooting and Nutrient Content of Creeping Bentgrass. *Crop Science* 38: 1639-1644.
- Crush J.R., Easton H.S. and Waller J.E. (2006) Genetic variation in perennial ryegrass for root profile characteristics. In: Mercer C.F. (ed.) *New Zealand Grassland Association Research and Practice Series No. 12*, pp. 63–65. Dunedin, New Zealand: New Zealand Grassland Association.
- Crush J.R., Nichols S.N., Ouyang L. (2010) Adventitious root mass distribution in progeny of four perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) groups selected for root shape. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 53: 193-200.
- Curl M. & R.T. Wilkins (1983) The comparative effects of defoliation, treading and excreta on a *Lolium perenne*-*Trifolium repens* pasture grazed by scheid. *Journal of Agricultural Science* 100, 451-460.
- Davidson R.L. (1969a) Effects of soil nutrients and moisture on root/shoot ratios in *Lolium perenne* L and *Trifolium repens* L. *Annals of Botany* 33:571-577.
- Dawson L.A., Grayston SJ, Paterson E. (2000) Effects of grazing on the roots and rhizosphere of grasses. Chapter 4 In: Lemaire G, Hodgson J, de Moraes A, de Carvalho FP, Nabinger C, eds. *Grassland ecophysiology and grazing ecology*. Wallingford, UK: CABI Publishing, 61-84.
- Dawson L.A., Thornton B., Pratt S.M., Paterson E. (2003) Morphological and topological responses of roots to defoliation and nitrogen supply in *Lolium perenne* and *Festuca ovina*. *New Phytologist* 161:811-818.
- Deinum B. (1985) Root mass of grass swards in different grazing systems. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 33, 377-384.

- Deru J., Van Eekeren N., De Boer, H. (2012) Rooting density of three grass species and eight *Lolium perenne* varieties. p. 604-606. In Grassland - a European resource? 24th General Meeting of the European Grassland Federation. Lublin, Poland. 3-7 June 2012.
- Deru J., Van Eekeren N., De Wit J., De Boer H. (2011). Effect van grassoort en N bemestingsniveau op productie, beworteling en N-mineraal in de herfst. Veldproef op zandgrond met Engels Raaigras, Kroppaar en Rietzwenkgras. Louis Bolk Instituut, Driebergen en Wageningen UR.
- Douglas J.T., Koppi A.J., Moran C.J. (1991) Changes in soil structure induced by wheel traffic and growth of perennial grass. *Soil and Tillage Research*, 23: 61-72.
- Drew M.C. (1975) Comparison of the effects of a localised supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system and the shoot in barley. *New Phytol.* 75, 479-490.
- Ennik G.C., M. Gillet & L. Sibma (1980) Effect of high nitrogen supply on sward deterioration and root mass. The role of nitrogen in intensive grassland production. Prins W.H. & G.H. Arnol (ed.). Pudoc, Wageningen. pp 67-76.
- Ennik G.C. (1981) Grasgroei en beworteling. CABO-verslag nr. 38, Centrum voor Agro Biologisch Onderzoek, Wageningen.
- Evans P.S. (1971) Root growth of *Lolium-perenne* L. 2. Effects of defoliation and shading. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 14: 552-562.
- Evans P.S. (1972) Root growth of *Lolium-perenne* L. 3. Investigation of mechanism of defoliation-induced suppression of elongation. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 15: 347-.
- Evans P.S. (1977) Comparative root morphology of some pasture grasses and clovers. *N.Z. Journal Agricultural Research* 20, 331-335.
- Evans P.S. (1978) Plant root distribution and water use patterns of some pasture and crop species. *N.Z. Journal of Agricultural Research* 21, 261-265.
- Faber J., Bakker, G., Bokhorst J., Hummelink, E., Laros I., Van Den Brink N. & Wösten, H. (2012) Onderzoek vochtvasthoudend vermogen bodem Gelderse Vallei. Deelresultaat 1 van project "Kijk eens wat vaker onder de graszode". Alterra, Wageningen.
- Fairley R.I. (1985) Grass root production in restored soil following opencast mining. In: Fitter A.H., Atkinson D., Read D.J., Usher M.B. (1985) *Ecological Interactions in Soil*. British Ecological Society, special publication 4: 81-85.
- Fitter A.H. (1985) Functional significance of root morphology and root system architecture. In: Fitter A.H., Atkinson D., Read D.J., Usher M.B. (1985) *Ecological Interactions in Soil*. British Ecological Society, special publication 4: 81-85.
- Föhse D., Claassen N., Jungk A. (1988) Phosphorus efficiency of plants I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. *Plant and Soil* 110, 101-109.
- Forde B., Lorenzo H. (2001) The nutritional control of root development. *Plant and Soil* 232: 51-68.
- Fransen B, de Kroon H, Berendse F. (1998) Root morphological plasticity and nutrient acquisition of perennial grass species from habitats of different availability. *Oecologia* 115: 351-358.
- Frissel J.Y., Hazebroek E. en Melman T.C.P. (2005) Extensief graslandbeheer op zeedijken. Effecten op de vegetatie, erosiebestendigheid en mogelijkheden voor exploitatie van aangepast beheer na een periode van 13 jaar. Wageningen, Alterra, Alterra rapport 1084, pp 52.
- Gales, K. (1979) Effects of water supply on partitioning of dry matter between roots and shoots in *Lolium perenne*. *Journal of Applied Ecology* 16: 863-877.

- Garwood E.A., Sinclair J. (1979) water-use and root distribution of grass species. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 29:834-834.
- Garwood E.A., Tyson K.C. and Sinclair J. (1979) use of water by 6 grass species. 1. Dry-matter yields and response to irrigation *Journal of Agricultural Science* [0021-8596] / vol:93 iss:AUG pg:13 -24
- Gibbs R.J., Reid J.B. (1992) comparison between net and gross root production by winter-wheat and by perennial ryegrass. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 20: 483-487.
- Goedewagen M.A.J. (1954) De oecologie van het wortelstelsel der gewassen. In: *De plantenwortel in de landbouw. Voordrachten in het kader van het Nederlands Genootschap voor Landbouwwetenschap.*
- He Z.L., Baligar V.C. Martens D.C., Ritchey K.D., Elrashidi M.A. (1999) Relationship of ryegrass growth to extractable phosphorus in acidic soil amended with phosphate rock, coal combustion by-products, limestone and cellulose. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30 (3&4): 457-470.
- Hodge A, Stewart J, Robinson D, Griffiths BS, Fitter AH. (2000) Competition between roots and soil micro-organisms for nutrients from nitrogen-rich patches of varying complexity. *Journal of Ecology* 88: 150-164.
- Hogenkamp, W. (2008) Graszaad met jasje van voedingsstoffen. In: *Boerderij* 93 nr 22 (26 februari 2008).
- Hoogerkamp M., Rogaar H., Eysackers H.J.P. (1983) Effects of earthworms on grassland on recently reclaimed polder soils in the Netherlands. In: *Earthworm ecology: from Darwin to vermiculture.* Satchell, J.E (ed.). Chapman and Hall. London: pp 85-105.
- Houlbrooke D.J., Thom E.R., Chapman R., McLay C.D.A. (1997) A study of the effects of soil bulk density on root and shoot growth of different ryegrass lines. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 40: 429-435.
- Hoving I., Velthof G. (2006) Landbouw- en milieukundige effecten van graslandvernieuwing op zand- en kleigrond. ASG / Alterra. Praktijkrapport Rundvee 83.
- Humphreys, M. W., Turner, L. B., O'Donovan, S. A., Macleod, C. J. A., King, I. P., Whalley, W. R., Haygarth, P. M. (2010). Grass root turn-over for improved soil hydrology to combat flooding. *Grassland Science in Europe, Vol 15, Oral Presentation: Grassland in a changing world. Proceedings of the 23rd General meeting of the European Grassland Federation, Kiel, Germany, 29 August - 2 September 2010,* Schnyder, H., Isselstein, J., Taube, F., Auerswald, K., Schelberg, J. et al. (Eds). *European Grassland Federation, 764-766.*
- Hutchings M.J., John E.A. (2004) The effects of environmental heterogeneity on root growth and root/shoot partitioning. *Annals of Botany* 94: 1-8.
- Jackson R.B., Canadell J., Ehleringer J.R., Mooney H.A., Sala O.E., Schulze E.D. (1996) A global analysis of root distribution for terrestrial biomes. *Oecologia* 108: 389-411.
- Jarvis S.C., Macduff J.H. (1989) Nitrate nutrition of grasses from steady-state supplies in flowing solution culture following nitrate deprivation and/or defoliation: I. Recovery of uptake and growth and their interactions. *Journal of Experimental Botany* 40, 965-976.
- Kreuzer K., Bonkowski M., Langel R., Scheu S. (2004) Decomposer animals (Lumbricidae, Collembola) and organic matter distribution affect the performance of *Lolium perenne* (Poaceae) and *Trifolium repens* (fabaceae) *Soil Biology & Biochemistry* 36: 2005-2011.
- Kutschera L., Lichtenegger E. (1982) *Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band 1 Monocotyledoneae.* Stuttgart, Gustav Fischer Verlag.
- Kutschera L., Lichtenegger E., Sobotik M. (2009) *Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemässiger Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues. 7. Band.* Frankfurt am Main, DLG-Verlag.

- Kuzyakov Y. (2002) Factors affecting rhizosphere priming effects. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165: 382-396.
- Laine P., Ourry A., Boucaud J., Salette J. (1998) Effects of a localized supply of nitrate on NO₃⁻ uptake rate and growth of roots in *Lolium multifolium* Lam. *Plant and Soil* 202:61-67.
- Macdonald L.M., Paterson E., Dawson L.A., McDonald A.J.S. (2006) Defoliation and fertiliser influences on the soil microbial community with two contrasting *Lolium perenne* cultivars. *Soil Biology and Chemistry* 38 (2006) 674-682.
- Mackie-Dawson L.A. (1999) Nitrogen uptake and root morphological responses of defoliated *Lolium perenne* (L.) to a heterogeneous nitrogen supply. *Plant and Soil* 209: 111-118.
- Macklon A.E.S., Mackie-Dawson L.A., Sim A., Shand C.A., Lilly A. (1994) Soil P resources, plant growth and rooting characteristics in nutrient poor upland grasslands. *Plant and Soil* 163: 257-266.
- Messmer, M. Hildermann, I. Thorup-Kristensen, K en Rengel, Z. (2012) Nutrient management in organic farming and consequences for direct and indirect selection strategies. In: Lammerts van Bueren E.T. en Myers J.R. (Eds). *Organic Crop Breeding*. John Wiley and Sons, UK.
- Mommer L., van Ruijven J, de Caluwe H., Smit-Tiekstra A.E., Wagemaker C.A.M., Ouborg N.J., Bogemann G.M. van der Weerden G.M., Berendse F., de Kroon H. (2010) Unveiling below-ground species abundance in a biodiversity experiment: a test of vertical niche differentiation among grassland species. *J. of Ecology* 98: 1117-1127.
- Murphy J.A., Zaurov D.E. (1994) Shoot and root-growth response of perennial ryegrass to fertilizer placement depth. *Agronomy Journal* 86:828-832.
- Mytton L.R., A. Cresswell P. Colbourn (1993) Improvement in soil structure associated with white clover. *Grass and Forage Science*, Volume 48, 84-90.
- Ourry A., Bigot J., Boucaud J. (1989) Protein mobilization from stubble and roots, and proteolytic activities during post-clipping re-growth of perennial ryegrass. *Journal of Plant Physiology* 134:298-303.
- Pant H.K., Adjei M.B., Scholberg J.M.S., Chambliss C.G., Rechcigl J.E. (2004) Forage production and phosphorus phytoremediation in manure-impacted soils. *Agronomy Journal* 96:1780-1786.
- Parsons A.J., Robson M.J. (1981) Seasonal-changes in the physiology of S24-perennial ryegrass (*Lolium perenne* L) .3. partition of assimilates between root and shoot during the transition from vegetative to reproductive growth. *Annals of Botany* 48:733-744.
- Powell C.L. (1977) Effect of phosphate fertilizer and plant density on phosphate inflow into ryegrass roots in soil. *Plant and Soil* 47:383-393.
- Robinson D., Linehan D., Gordon D.C. (1994) Capture of nitrate from soil by wheat in relation to root length, nitrogen inflow and availability. *New Phytol.*: 128, 297-305.
- Schaffers, A.P., Frissel, J.Y., Van Adrichem M.H.C. en Huiskes, H.P.J.(2010) Seizoensverloop in de doorworteling van dijkgrasland. VTV toetsing buiten het winterseizoen nader bekeken. Alterra-rapport 2012. Alterra, Wageningen.
- Scheu S. (2003) Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives. *Pedobiologia* 47, 846–856, 2003.
- Schuermans J.J. (1954) De bewortelingsproblemen op grasland. In: De plantenwortel in de landbouw. Voordrachten in het kader van het Nederlands Genootschap voor Landbouwwetenschap.
- Sheldrick R.D., Lavender R.H., Martyn T.M. (1994) Effects of delay in reapplication of nitrogen fertiliser following cutting silage from a ryegrass sward. *Grass and Forage Science* 49: 369-371.
- Steingrobe B., Schmid H., Claassen N. (2001) Root production and root mortality of winter barley and its implication

- with regard to phosphate acquisition. *Plant and Soil* 237: 239-248
- Stewart A.M., Frank D.A. (2008) Short sampling intervals reveal very rapid root turnover in a temperate grassland. *Oecologia* 157:453-458.
- Sullivan J.T., Sprague V.G. (1949) The effect of temperature on the growth and composition of the stubble and roots of perennial ryegrass. *Plant Physiology* 24:706-719.
- Tisdall J.M., Oades J.M. (1979) Stabilisation of soil aggregates by root systems of ryegrass. *Australian Journal of Soil Research* 17, 429-441.
- Troughton A. (1956) Studies on the growth of young grass plants with special reference to the relationship between the shoot and root systems. *Journal of the British Grassland Society* 11: 56-65.
- Troughton A. (1978a) The Effect of the Prevention of the Production of Additional Root Axes upon the Growth of Plants of *Lolium perenne*. *Annals of Botany* 42: 269-276.
- Troughton A. (1978b) Influence of reproductive development upon root-system of perennial ryegrass and some effects upon herbage production. *Journal of Agricultural Science* 91: 427-431.
- Troughton A. (1980) Production of root axes and leaf elongation in perennial ryegrass in relation to dryness of the upper soil layer. *Journal of Agricultural Science* 95: 533-538.
- Van der Krift T.A.J., Berendse F. (2002) Root life spans of four grass species from habitats differing in nutrient availability. *Functional Ecology* 16, 198-203.
- Van der Schoot J.R., Van Dijk W. (2002) Zaadbehandeling van snijmaïs met *Trichoderma*. PPO-projectrapport nr 110156.
- Van Eekeren N. (1993) Basis concepts of range management and the implications for Malakand Division. DHV Consultants, Amersfoort.
- Van Eekeren N., De Boer H., Bloem J., Schouten T., Rutgers M., De Goede R., Brussaard L. (2009) Soil biological quality of grassland fertilized with adjusted cattle slurries in comparison with organic and inorganic fertilizers. *Biol Fertil Soils* 45: 595-608.
- Van Eekeren N., Bokhorst J. (2009) Beoordeling bodemkwaliteit zandgrond: een inventarisatie van bodemindicatoren voor de veehouderij. Zorg voor Zand rapport nr 7. Louis Bolk Instituut, Driebergen.
- Van Eekeren N., Bommelé L., Bloem J., Schouten A.J., Rutgers M., De Goede R., Reheul D., Brussaard L. (2008) Soil Biological quality after 36 years of ley-arable cropping, permanent grassland and permanent arable cropping. *Applied Soil Ecology* 40: 432-446.
- Van Eekeren N., Bos M., De Wit J., Keidel H., Bloem J. (2010) Effect of different grass species mixtures on soil quality in relation to root biomass and grass yield. *Applied Soil Ecology* 45: 275-283.
- Van Eekeren N., Heeres E., Smeding F. (2003) Leven onder de graszode: discussiestuk over het beoordelen en beïnvloeden van bodemleven in de biologische melkveehouderij. LV 52, Louis Bolk Instituut, Driebergen.
- Van Eekeren N., Murray P.J., Smeding F.W. (2007) Soil biota in grassland, its ecosystem services and the impact of management. In: De Vliegheer, A., Carlier, L. Permanent and Temporary Grassland: Plant, Environment and Economy. *Grassland Science in Europe*.
- Van Loo E.N., Dolstra O., Humphreys M.O., Wolters L., Luessink W., de Riek J. and Bark N. (2003) Lower nitrogen losses through marker assisted selection for nitrogen use efficiency and feeding value in ryegrass (*Nimgrass*). *Vortrage fur Pflanzenzuchtung*, 59, 270–279. (in Crush, 2007)
- Verlinden, G., Coussens T., De Vliegheer† A., Baert G. and Haesaert G. (2010) Effect of humic substances on nutrient uptake by herbage and on production and nutritive value of herbage from sown grass pastures. *Grass and Forage Science* 65: 133-144.

- Vertes F., Le Corre L., Simon J.C., Rivière J.M. (1988) Effets du piétinement de printemps sur un peuplement de trèfle blanc pur ou en association. Fourrages 116, 347-366.
- Weaver J.E.; Albertson, F.W. (1943) Resurvey of Grasses, Forbs, and Underground Plant Parts at the End of the Great Drought. In : Ecological Monographs, Volume 13, Nr 1, pp 100.
- Wösten H. (2012). Modelontwikkeling, deelrapport 2, spoor 1b van het project "Kijk eens wat vaker onder de graszode".
- Young D.J.B. (1958) A study of the influence of nitrogen on the root weight and nodulation of white clover in a mixed sward.
Grass and Forage Science 13: 106-14

Appendix: lijst van grassoorten met botanische en Nederlandse naam

Botanische naam	Nederlandse naam
<i>Agrostis capillaris</i> L.	Gewoon struisgras
<i>Agrostis tenuis</i>	Struisgras
<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	Gewoon reukgras
<i>Arrhenatherum elatius</i> L.	Glanshaver / frans raaigras
<i>Cynosurus cristatus</i> L.	Kamgras
<i>Dactylis glomerata</i> L.	Kropaar
<i>Festuca arundinacea</i> Schreber	Rietzwenkgras
<i>Festuca ovina</i> L.	Schapengras
<i>Festuca pratensis</i> Hudson	Beemdlangbloem
<i>Festuca rubra</i> L.	Roodzwenkgras
<i>Holcus lanatus</i> L.	Gestreepte Witbol
<i>Lolium multifolium</i> Lamk.	Italiaans raaigras
<i>Lolium perenne</i> L.	Engels raaigras
<i>Nardus stricta</i>	Borstelgras
<i>Phleum pratense</i> L.	Timoteegras
<i>Poa pratensis</i> L.	Veldbeemdgras
<i>Poa trivialis</i> L.	Ruw beemdgras