



Vergelijking van de bodembelasting bij agrarisch veldwerk in 1980 en 2010

G.D. Vermeulen, B.R. Verwijs & J.J.H. van den Akker





Vergelijking van de bodembelasting bij agrarisch veldwerk in 1980 en 2010

G.D. Vermeulen¹, B.R. Verwijs¹ & J.J.H. van den Akker²

¹ Plant Research International

² Alterra

© 2013 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Plant Research International. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO.

Voor nadere informatie gelieve contact op te nemen met: DLO in het bijzonder onderzoeksinstituut Plant Research International, Business Unit Agrosysteemkunde.

DLO is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Plant Research International, onderdeel van Wageningen UR Business Unit, Business Unit Agrosysteemkunde

Adres : Postbus 616, 6700 AP Wageningen
: Wageningen Campus, Droevendaalsesteeg 1, Wageningen
Tel. : 0317 – 48 05 29
Fax : 0317 – 41 80 94
E-mail : info.pri@wur.nl
Internet : www.wageningenUR/nl/pri

Inhoudsopgave

	pagina
Samenvatting	1
1. Inleiding	3
2. Methode	5
2.1 Regelgeving voor machinegewicht en aslast	5
2.2 Karakterisering van de bodembelasting door landbouwmachines	6
2.2.1 Keuze van typerende machines voor veldwerk	6
2.2.2 Bepaling typerende wiellast en banddruk	7
2.3 Wijze van berekenen van typerende spanningen in de grond	8
3. Wiellasten en banddrukken van landbouwmachines in 1980 en 2010	11
3.1 Trekkers	11
3.2 Ploegen	12
3.3 Gewasbescherming	14
3.4 Transport van akkerbouwproducten	15
3.5 Transport bij de voederwinning	17
3.6 Mest toedienen	18
3.7 Maïs en gras hakselen	20
3.8 Graanoogst	22
3.9 Aardappel oogst	23
3.10 Suikerbieten oogst	25
4. Grondspanningen in 1980 en 2010	29
5. Vergelijking van de bodembelasting in 1980 en 2010	31
6. Discussie en conclusies	35
7. Bronnen	37

Samenvatting

Bodemverdichting wordt in de Europese bodemstrategie genoemd als één van de belangrijkste aantastingen van de bodem in Europa. De inzet van zware, bodemonvriendelijke machines in de landbouw, vaak onder natte bodemomstandigheden, wordt als de belangrijkste oorzaak hiervan beschouwd. De Technische Commissie Bodem (TCB) constateert dat op basis van schattingen in grote delen van Nederland sprake zou zijn van gevoeligheid van de bodem voor ondergrondverdichting en dat er door de (toenemende) bodembelasting binnen de landbouw al ernstige verdichting zou zijn opgetreden. In het advies wordt o.a. geconcludeerd dat kennis ontbreekt over de werkelijke toename van de bodembelasting door de Nederlandse landbouw in de laatste decennia. De doelstelling van de hier gerapporteerde studie was om te onderzoeken of de bodembelasting door verschillende typen landbouwmachines in de afgelopen 30 jaar inderdaad toegenomen is, zoals wordt verondersteld. In dit project zijn niet de risico's dat ondergrondverdichting op zal treden onderzocht, maar de verzamelde informatie over bodembelastingen in 2010 werd in een parallel lopend project gebruikt om de risico's op ondergrondverdichting in Nederland beter in kaart te brengen, afhankelijk van grondsoort en landgebruik (van den Akker *et al.*, 2012).

Het begrip bodembelasting wordt gebruikt voor zowel het drukpatroon op de bodem onder de wielen van machines (bodemdruk) als voor de daardoor veroorzaakte drukken op verschillende dieptes in de grond (grondspanningen). In het rapport wordt eerst de ontwikkeling van de bodemdruk van verschillende machines geïnventariseerd. Het bodemdrukpatroon wordt hoofdzakelijk bepaald door de wiellast, het type band, de bandenmaat en de banddruk (luchtdruk in de band). Om de belasting van de ondergrond te karakteriseren werd met de uit de machinegegevens afgeleide drukpatronen onder de wielen berekend wat de piekspanningen op 25, 40 en 50 cm diepte in de ondergrond waren, in 1980 en 2010.

Om ontwikkeling van de bodembelasting in de afgelopen 30 jaar in Nederland te bepalen is eerst de ontwikkeling van de bodemdruk van de machines geïnventariseerd. Dit werd gedaan door vergelijking van bodemdrukpatroonkenmerken van 13 topsegment-machines uit 1980 en 19 topsegment-machines uit 2010. Met topsegment-machines wordt bedoeld machines die typisch door grotere bedrijven en loonwerkers gebruikt werden. Omdat het risico op ondergrondverdichting bepaald wordt door de hoogste bodembelastingen die in de loop van de tijd plaatsvinden, wordt de bodembelasting van deze topsegment machines representatief geacht voor de werkelijk voorkomende bodembelasting in de praktijk. In vergelijking met 1980 bleken de wiellasten in 2010 gemiddeld twee keer zo hoog, waren de banden gemiddeld ca. 70% breder en was de benodigde luchtdruk in de banden gemiddeld 20% lager geworden. Als gevolg van deze ontwikkelingen in het drukpatroon onder de wielen van landbouwmachines van 1980 tot 2010 bleef de bodembelasting, uitgedrukt als piek-grondspanning, op 25 cm diepte in de grond ongeveer gelijk. Dieper in de ondergrond nam de bodembelasting echter toe, met 10% op 40 cm diepte en met 20% op 50 cm diepte. Daarmee is ook het risico op verdichting van vooral de diepere ondergrond in de afgelopen 30 jaar duidelijk toegenomen.

Door drie innovaties die in 2010 in de praktijk nog maar in enkele topsegment machines werden toegepast, zijn er juist voor de meest bodembelastende veldwerkzaamheden meer mogelijkheden dan in 1980 om de belasting van de ondergrond te verlagen. Deze methoden betreffen: 1) het bovenoverploegen in plaats van "door de voor" ploegen; 2) de toepassing van een aanvoersleepsling bij de toediening van drijfmest in plaats van het rijden met een mesttank over het veld en 3) de toepassing van rubber rupsen in plaats van banden op zware oogstmachines. Aanbevolen wordt om uitbreiding van de toepassing van deze innovaties te stimuleren en daarmee de belasting van de ondergrond en het risico op verdere verdichting van de ondergrond in de toekomst te verlagen.

1. Inleiding

Bodemverdichting is een aantasting van de fysieke kwaliteit van de bodem. Het wordt in de Europese bodemstrategie (Commissie van de Europese Gemeenschappen, 2006) genoemd als één van de belangrijkste aantastingen van de bodem in Europa. Binnen de landbouw wordt de inzet van zware, bodemonvriendelijke machines, bovendien vaak in combinatie met natte bodemomstandigheden, als de belangrijkste oorzaak beschouwd voor bodemstructuurverlies en bodemverdichting, zowel in de bouwvoor als in de ondergrond. Omdat niet goed duidelijk was in hoeverre deze problematiek ook in Nederland speelt werd door de Technische Commissie Bodem (TCB) een advies over bodemverdichting uitgebracht (TCB, 2011) op verzoek van de ministeries I&M en EL&I en het Interprovinciaal Overleg (IPO).

De TCB constateert dat vooral verdichting van de ondergrond (20-60 cm) van belang is omdat deze moeilijk herstelt. Op basis van schattingen (Van den Akker and Hoogland, 2011) zou in grote delen van Nederland sprake zijn van gevoeligheid van de bodem voor ondergrondverdichting en daar zou door de (steeds toenemende) bodembelasting binnen de landbouw al ernstige verdichting zijn opgetreden, met ongewenste gevolgen voor de duurzaamheid van de landbouwproductie.

In het TCB advies wordt o.a. geconcludeerd dat kennis ontbreekt over: a) de werkelijke toename van de aslasten en bodemdrukken in de laatste decennia; b) de omvang van de ondergrondverdichting in Nederland en c) het oorzakelijk verband tussen ondergrondverdichting en de hieraan toegeschreven effecten. De hier gerapporteerde studie heeft betrekking op de kennislacune genoemd onder a).

Conform de aanbeveling van de TCB (2011) was de doelstelling van de hier gerapporteerde studie om de aanwijzing uit een verkennend onderzoek dat de druk op de bodem door landbouwmachines de afgelopen 30 jaar is toegenomen (Vermeulen en van den Akker, 2010) verder te onderzoeken en te onderbouwen. Inzicht in de mogelijk toegenomen bodemdruk door verschillende typen landbouwmachines is belangrijk om gericht beleid te kunnen voeren ter voorkoming van ondergrondverdichting.

De verkenning in 2010 werd uitgevoerd voor trekkers, landbouwwagens, maaidorsers en apparatuur voor mesttoediening. De voorliggende rapportage betreft een uitgebreidere studie dan in 2010, waarbij ook de bodembelasting van een aantal andere, mogelijk belastingbepalende machines zoals bietenrooimachines, veldhakselaars, aardappelrooimachines, veldspuiten, opraapwagens en risterploegen gerapporteerd wordt.

Het is niet bekend of de natheid van de grond waarbij de machines nog kunnen werken veranderd is tussen 1980 en 2010. Een mogelijke verandering in de gemiddelde natheid van de grond en de consequenties daarvan voor de doorwerking van de bovengrondse bodembelasting naar grondspanningen in de bodem werden in het huidige onderzoek daarom niet meegenomen.

Het risico op verdichting van de ondergrond wordt bepaald door het landgebruik (gebruikte type machines), de maximale piek-grondspanningen die daarmee samenhangen en de sterkte van de grond (grondsoort, huidige dichtheid); als de piek-grondspanningen groter zijn dan de sterkte van de grond zal de bodemstructuur bezwijken en verder verdichten. Verdichtingsrisico's zijn niet in dit project in kaart gebracht, maar de verzamelde informatie over bodembelastingen in 2010 werd als basis gebruikt in een parallel aan deze studie lopend project om de risico's op ondergrondverdichting in Nederland, afhankelijk van grondsoort en landgebruik, beter in kaart te brengen (van den Akker *et al.*, 2012).

2. Methode

Het begrip bodembelasting wordt gebruikt voor zowel het drukpatroon op de bodem onder de wielen van machines (bodemdruk) als voor de daardoor veroorzaakte drukken op verschillende dieptes in de grond (grondspanningen). In het rapport wordt eerst de ontwikkeling van de bodemdruk van verschillende machines geïnventariseerd. Het bodemdrukpatroon wordt hoofdzakelijk bepaald door de wiellast, het type band, de bandenmaat en de banddruk (luchtdruk in de band). Omdat landbouwvoertuigen ook op de openbare weg rijden is daar regelgeving van toepassing waardoor de voertuig- en aslasten beperkt worden. Omdat dit ook een zekere begrenzing geeft voor aslasten en banddrukken in het veld, wordt eerst de regelgeving besproken (paragraaf 2.1). Vervolgens wordt besproken hoe de belasting in het veld gekarakteriseerd is om per soort veldwerk tot vergelijkbare cijfers voor de belasting op de grond (het bodemdrukpatroon onder de wielen) in 1980 en 2010 te komen (paragraaf 2.2). Ten slotte wordt de methodiek besproken om de voorkomende spanningen in de ondergrond te berekenen (paragraaf 2.3).

2.1 Regelgeving voor machinegewicht en aslast

Informatie over de regelgeving voor landbouwvoertuigen in 1980 was niet binnen het kader van het project te achterhalen. In die tijd waren er nog veel voertuigen, waaronder trekkers, die formeel niet sneller dan 16 km per uur mochten rijden. In de praktijk werd rond 1980 op de weg vaak 20-30 km/uur gereden. In 1994 trad het voertuigreglement van de wegenverkeerswet in werking, dat talloze keren gewijzigd werd conform EU-richtlijnen.

Sinds 1 mei 2009 is een nieuwe 'Regeling voertuigen' van kracht (Tabel 1). Zonder op specifieke situaties in te gaan is het algemene beeld dat op de openbare weg de last op een wiel maximaal 5 ton mag zijn voor een niet-aangedreven wiel en 5,75 ton voor een aangedreven wiel. Deze maximum lasten gelden alleen op de openbare weg, maar zijn ook de maximale lasten op het veld als het transport en toediening of verzamelen en afvoeren van producten betreft. Voor werktuigen met bunkers die in het veld gevuld worden, maar die niet met volle bunker over de weg rijden zijn de wiellasten in het veld meestal veel hoger.

In 2010 was de rijsnelheid bij zelfrijders ongeveer gelijk aan die in 1980, namelijk 30 km/uur. De rijsnelheid bij transport over de weg is bij combinaties met een trekker momenteel ca. 40 km/uur, al is het aandeel trekkers dat sneller kan rijden dan 40 km/uur groeiende. Veel gemeenten hebben een langdurende ontheffing van het ministerie om verruiming van de regels voor landbouwmachines toe te staan. Wat betreft de toegestane lasten is het daarom vaak mogelijk om voor uitzonderlijk transport tot een totaalgewicht van 100 ton ontheffing te krijgen.

Tabel 1. *Maximaal toegestane wiellasten, aslasten en voertuiggewichten volgens de Regeling Voertuigen 2009.*

Kenmerk	Maximale wiellast (ton)	Maximale aslast (ton)	Maximaal voertuiggewicht (ton)
Trekkers	5 (vrijlopend) 5,75 (aangedreven)	10 (vrijlopend) 11,5 (aangedreven)	18 (2 assen) 24 (3 assen)
Wagens	5	10	
Trekker + wagen		10 (vrijlopend) 11,5 (aangedreven)	
Zelfrijders	6	12	50

2.2 Karakterisering van de bodembelasting door landbouwmachines

De hoogte van spanningen in de grond onder een wiel, dat wil zeggen het verdichtingsrisico, wordt voor een groot deel bepaald door de last op de band en het drukpatroon in het contactvlak van band en grond (Söhne, 1953). De grootte van het contactvlak wordt bepaald door de grootte van de banden en de banddruk die toegepast wordt. Omdat met de wiellast, de bandbreedte en de benodigde banddruk samen de spanningen in de grond berekend kunnen worden zijn deze drie parameters gekozen als indicatoren voor de bodembelasting. Hoe de typerende wiellasten, bandbreedtes en benodigde banddrukken bepaald zijn voor de verschillende veldwerkzaamheden in 1980 en in 2010 is in de hiernavolgende paragrafen beschreven.

Bekend is dat herhaalde belasting kort na elkaar een extra verdichtend effect kan hebben en dat het voor het effect van verdichting op het functioneren van de bodem als geheel belangrijk is hoeveel procent van het veld bereiden wordt. Bij gelijkblijvende bodemdruk zal zowel uitbreiding van het aantal assen onder een machine als toepassing van bredere banden of dubbellucht daarom waarschijnlijk ongunstig zijn. Minder benodigde werkgangen door het vervallen van wagentransporten op het veld bij gebruik van een bunkerrooier of door vergroting van de werkbreedte van machines zal waarschijnlijk gunstig zijn. Bij rijden in hondegang wordt herhaald berijden ingewisseld voor een groter deel van het veld berijden. Ook de gewasrotatie op een bedrijf bepaalt mede hoe intensief de grond bereiden wordt; bij veel rooivruchten in de rotatie is de intensiteit van berijden door de jaren heen hoger. Er is onvoldoende bekend om de verdichtingseffecten van deze aspecten van de berijdingsintensiteit te kwantificeren. Daarom is de berijdingsintensiteit niet meegewogen in de vergelijking van de bodembelasting in 1980 en 2010.

2.2.1 Keuze van typerende machines voor veldwerk

De variatie in machines en werktuigen voor het uitvoeren van veldwerkzaamheden is groot door de verscheidenheid aan gewassen, schaalgrootte, gebruikte systemen en optionele uitrusting. Kennis over welke machines het meest gebruikt werden is nog bij een aantal mechanisatieliefhebbers bekend, maar voor de meeste machines is geen informatie beschikbaar over bijvoorbeeld verkochte aantallen. Van een aantal machines zijn ook geen afdoende specificaties bekend. Een gedetailleerde vaststelling van het gebruik van landbouwmachines rond 1980 en rond 2010 is daarom niet mogelijk. We mogen er echter van uit gaan dat de bodembelasting op een perceel vooral bepaald wordt door de meest belastende machines die er in de loop der jaren overheen rijden. In het algemeen zijn dit de relatief grote machines die door loonwerkers gebruikt worden. Daarom werd besloten om de studie af te bakenen tot:

1. Het topsegment van de gebruikte landbouwmachines in 1980 en 2010, die bij loonwerkers en grote landbouwbedrijven in gebruik waren;
2. Machines die naar schatting op tenminste 5% van het te bewerken areaal gebruikt werden;
3. Trekkers, landbouwwagens, opraapwagens, apparatuur voor mesttoediening, maaidorsers, bietenrooimachines, veldhakselaars, aardappelrooimachines, veldspuiten, en risterploegen, waarvan bekend is dat deze mogelijk het meest belastend voor de bodem zijn;
4. De standaard bij de machines geleverde of, indien bekend, meest gebruikelijke banden voor de machine.

Bij de verkennende studie in 2010 werd het 'topsegment 1980' afgeleid uit een onderzoek uit 1980 in Zeeland waarbij de werktuiginventarissen, inclusief de specificaties van gewichten, banduitrusting, aantal en type uitgevoerde veldbewerkingen, bodemcondities etc. op 27 bedrijven in Zeeland vastgelegd zijn (Van de Zande, 1983). De gegevens over gewichten en banduitrusting van machines in het 'topsegment 2010' werden opgezocht op internet en in opgevraagde folders, voor zover voorhanden. De vergelijking in 2010 werd uitgevoerd voor trekkers, landbouwwagens, maaidorsers en apparatuur voor mesttoediening. In de voorliggende studie is dit onderzoek vervolgd en ook uitgevoerd voor overige mogelijk belastingbepalende machines zoals bietenrooimachines, veldhakselaars, aardappelrooimachines, veldspuiten, opraapwagens en risterploegen. Voor deze machines was onvoldoende informatie over de situatie in 1980 beschikbaar uit de inventarisatie in Zeeland. Daarom zijn de beschikbare specificaties van een groot aantal topsegment machines uit die tijd verzameld via raadpleging van foldermateriaal van het voormalige museum Historische Landbouwtechniek, dat nu als speciale collectie van de bibliotheek van Wageningen UR

beschikbaar is (Anonymus, 2008). Voor het 'topsegment 2010' werd weer informatie verzameld van internet, via opvraging van informatie direct bij importeurs en door raadpleging van andere bronnen.

2.2.2 Bepaling typerende wiellast en banddruk

Uit de verzamelde informatie is na een eerste analyse een beperkt aantal typerende machines per bewerings-categorie gekozen. Voorwaarde hierbij was dat voor deze machines voldoende gegevens beschikbaar waren voor verdere analyse.

Per geselecteerde machine of trekker-machinecombinatie werd eerst geanalyseerd hoe hoog de totaalgewichten en de as- en wiellasten waren, zowel op de openbare weg als in het veld, zowel leeg als vol en zowel in werkstand en transportstand, voor zover van toepassing. In veel gevallen waren slechts beperkte gegevens voorhanden, zoals het totale gewicht van de lege machine. Op basis van de bouw van de machine kon echter de verdeling over de assen geschat worden. Voor combinaties van trekkers met wagens en getrokken oogstmachines werd hierbij rekening gehouden met de oplegdruk, waaruit ook de gewichtsoverdracht van de vooras naar de achteras van de trekker werd berekend. Ook bij de combinatie van trekker met ploeg werd geschat wat de gewichtsoverdracht van ploeg en trekkervooras op de achteras van de trekker is. Voor elke machine of trekker-werktuigcombinatie werd het wiel met de hoogste last tijdens het veldwerk gekozen en deze wiellast werd, in combinatie met de breedte van de band en de minimaal benodigde banddruk (in het veld en/of op de weg) als kenmerkend beschouwd voor de bodembelasting door de machine.

Na vaststelling van de kenmerkende wiellast per afzonderlijke machine werden voor elke gekozen veldbewerking, zowel voor 1980 als voor 2010 één of twee machines gekozen die wat betreft de capaciteit typerend waren voor het topsegment van de in Nederland gebruikte machines. Voor deze machine werd verder geanalyseerd welke banden standaard gemonteerd waren en welke banddruk minimaal nodig was om in de verschillende situaties (wegtransport en veldwerk, leeg en vol) te voldoen aan de aanbevelingen van de bandenfabrikanten.

Voor de banden in 1980 werd o.a. de relatie tussen bandafmetingen en banddruk volgens Perdok en Arts (1986) gebruikt om de minimaal noodzakelijke banddruk te bepalen. Dit gebeurde als het relatief soepele diagonaalbanden (laagst mogelijke ply-waarde) met een 'normale' sectiehoogte betrof (hoogte van de band was ongeveer gelijk aan de breedte van de band). Voor de overige banden in 1980 en de banden in 2010 werden cijfers uit de bandenboekjes van de fabrikanten gebruikt. Voor oude bandenmaten moest op de oude bandenboekjes worden teruggegrepen. Voor de meeste moderne banden zijn de bandbelastingstabellen te raadplegen via internet, bijvoorbeeld op de 'Kennisakker website' (2012). In veel gevallen worden momenteel radiaalbanden gebruikt. In een aantal gevallen kon gekozen worden uit banden met een verschillende load index. In dit geval werd de laagst mogelijke load index gekozen, wat ook weer overeenkomt met de meest soepele band.

Op de weg is de snelheid hoger dan op het veld. Daarom moeten bij gelijke belasting op de weg hogere banddrukken toegepast worden dan op het veld. Normaal wordt de banddruk niet aangepast (verlaagd) als men op het veld aan het werk gaat. Daarom is de benodigde banddruk op de weg vaak bepalend voor de banddruk die bij gebruik van de machines op het veld toegepast wordt. Om banddrukken op de weg en in het veld te optimaliseren zijn systemen ontwikkeld om de banddruk centraal te kunnen aanpassen (CTIS, central tyre inflation systems). Deze systemen zijn echter beperkt op de machines voorhanden en worden bovendien niet altijd (ten volle) benut. Waarschijnlijk omdat daarvoor extra handelingen nodig zijn en omdat het opzoeken van de grenzen van de technische mogelijkheden van banden door sommige trekkerchauffeurs als risicovol voor de banden wordt ervaren. Bij de bepaling van de typische banddruk voor de geselecteerde wielen werd daarom geen rekening gehouden met de mogelijkheid om CTIS te gebruiken. CTIS wordt vooral gebruikt onder natte omstandigheden en geeft dan een direct voordeel omdat dan doorgewerkt kan worden terwijl machines zonder CTIS niet verder kunnen. In het geval dat machines alleen in het veld beladen worden, zoals bij oogstmachines met een bunker, kan het zijn dat de benodigde banddruk in het veld juist hoger is dan die op de weg.

De procedure om de typerende banddruk te bepalen hield in dat eerst per machine bepaald werd welke wielbelasting maximaal voorkwam op de weg en in het veld. Vervolgens werd bepaald welke banddrukken bij deze wielbelastingen minimaal nodig waren in de door de machinefabrikant standaard op deze wielen geleverde banden. De hoogste van de twee gevonden banddrukken, ten slotte, werd als typerend beschouwd, zowel de bodembelasting in het veld. Voor de bepaling van de minimaal benodigde banddruk bij werk in het veld werden de toelaatbare belastingen bij 10 km/uur als uitgangspunt genomen. Alleen voor combines, een aantal bunkerrooiers en zelfrijdende bemesters werden de toelaatbare belastingen bij 10 km/uur en kort-cyclische belasting gebruikt. Voor transport over de weg zijn voor zelfrijdende machines zowel voor 1980 als voor 2010 de toelaatbare belastingen bij 30 km/uur toegepast. Voor combinaties met de trekker is voor transport over de weg in 1980 30 km/uur als uitgangspunt genomen en in 2010 40 km/uur.

In veel gevallen was het mogelijk om de banddrukken te verlagen door de keuze van optioneel aangeboden banden met een groter luchtvolume. Omdat montage van de standaardbanden althans in 1980 het meest gebruikelijk was, is de mogelijkheid om bodemvriendelijker banden te monteren niet meegenomen in de karakterisering van de bodembelasting. Anno 2010 worden door de Nederlandse boeren onder trekkers waarschijnlijk juist vooral bodemvriendelijker banden dan de standaard banden gekozen. Onbekend is echter wat de maat van een meest gemonteerde band is. Om een eerlijk vergelijk te maken tussen 1980 en 2010 hebben we daarom toch voor de standaardband gekozen. Voor bietenrooiers, aardappelrooiers, bemesters is gerekend met de in de folder aangegeven band, waarvan aangenomen is dat het de standaardband betreft.

Een opkomende ontwikkeling in 2010 was toepassing van de ultraflex technologie bij landbouwbanden. Volgens fabrikant Michelin kan hierdoor bij gelijke belasting tot 40% lagere banddruk toegepast kan worden dan met dezelfde maat conventionele banden. Deze banddrukverlaging is mogelijk doordat de banden flexibeler zijn, meer mogen afplatten en daardoor een groter contactvlak band-grond (footprint) hebben dan conventionele banden. Door minder warmteontwikkeling bij de vervorming van de band zijn bovendien de verschillen tussen de aanbevolen banddrukken in het veld en op de weg grotendeels weggevalen; in beide gevallen kan met relatief lage banddrukken gereden worden. De implicaties van toepassing van deze banden voor de uitgeoefende bodemdrukken van machines en de daardoor optredende bodemdrukken zijn niet uitgebreid onderzocht, maar een beperkte analyse laat zien dat de maximale wiellasten bij dit type banden vooralsnog beperkt zijn tot 5 ton bij 100 kPa banddruk (1 bar).

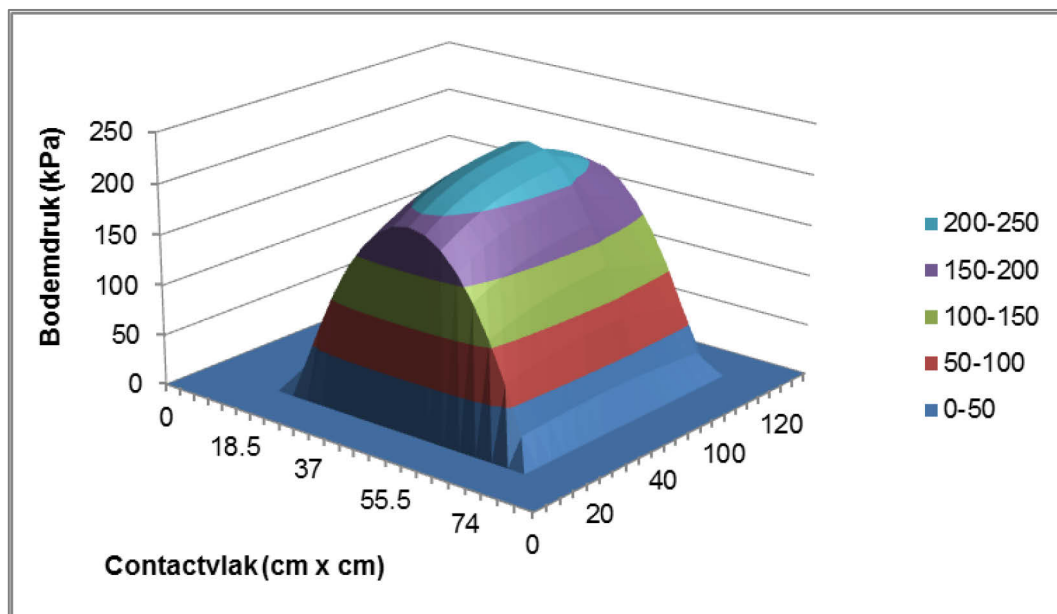
2.3 Wijze van berekenen van typerende spanningen in de grond

Met behulp van de typerende wiellasten en banddrukken bij de verschillende soorten veldwerk werd met het Soil Compaction Model SOCOMO (Van den Akker, 2004) berekend welke piekspanningen in de ondergrond typerend zijn. SOCOMO is een (pseudo-)analytische model waarbij de bodem wordt opgevat als een homogeen, elastisch, isotroop en semi-oneindig medium. Dit is een sterke versimpeling van de grond, maar uit metingen in de grond onder wielen in de praktijk blijkt dat dergelijke modellen in ieder geval wat betreft grondspanningen goede resultaten geven (Van den Akker, 2004, Defossez & Richard, 2002, Keller *et al.*, 2007, Schjønning *et al.*, 2012). Een belangrijk voordeel van het analytische model is dat de invoer beperkt is. Voor de berekening van spanningen in de grond betreft dit de invoer van de gronddruk die door een band op de grond wordt uitgeoefend en een concentratiefactor v . SOCOMO kan ook berekenen wanneer de sterkte van de grond door de uitgeoefende grondspanningen wordt overschreden, waardoor de grond bezwijkt en daardoor vervormt en verdicht. Voor die berekening zijn de sterkte-eigenschappen van de grond nodig. In deze studie beperken we ons echter tot de berekening van grondspanningen. Effecten van deze spanningen op de dichtheid van de grond zijn niet bestudeerd en evenmin welke cumulatieve effecten herhaald berijden, rijden onder diverse bodemomstandigheden en het losmaken en weer berijden zullen hebben.

De concentratiefactor geeft aan hoe sterk de zijwaartse spreiding van de grondspanningen met de diepte is. Hoe droger en steviger de grond, des te beter spreiden de grondspanningen zich in de diepte zijwaarts uit en des te sneller nemen de grondspanningen met de diepte af. Bij een echt homogeen, elastisch en isotroop materiaal is de concentratiefactor $v = 3$. Deze waarde wordt ook gebruikt voor droge, stevige grond (Koolen & Kuipers, 1983). Hoe natter de grond, des te slechter wordt de zijwaartse spreiding met de diepte. De grondspanningen concentreren zich

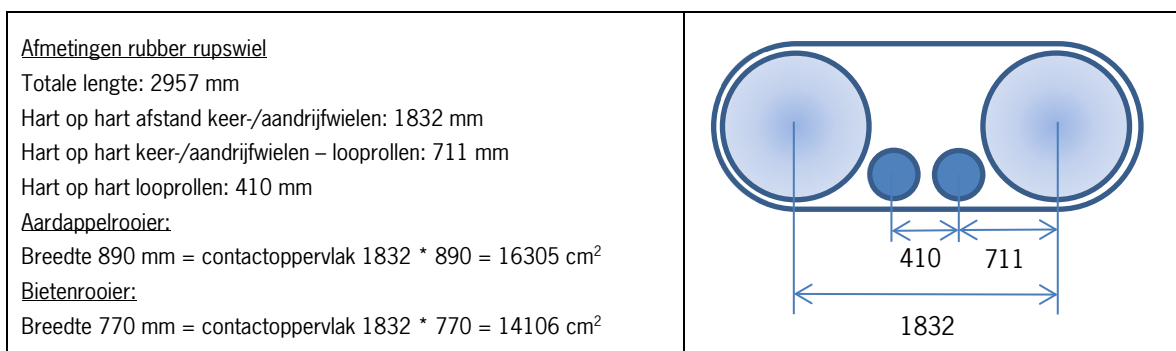
dan meer onder de wiellast en de concentratiefactor neemt toe tot 5. Een concentratiefactor van 4 wordt gebruikt voor vochtige grond (Koolen en Kuipers, 1983) en geeft in het algemeen een goede overeenkomst met de grondspanningen die in de praktijk onder wiellasten worden gemeten. De berekeningen in dit rapport zijn uitgevoerd met een concentratiefactor van $v = 4$, dus voor vochtige grond zoals in Nederland bijvoorbeeld tijdens grondbewerkingen en de oogst veelvuldig voorkomen.

De drukverdeling in het contactvlak band – grond is benaderd volgens de methode van Van den Akker (2004). Dat wil zeggen dat in de lengterichting (rijrichting) de spanningsverdeling de vorm heeft van een tweedegraads parabool en in de dwarsrichting een derdegraads parabool, waarbij de druk onder de zijkant van de band (de wangen) 80% is van de drukspanning in het centrum van het contactvlak. De gemiddelde druk in het contactvlak is volgens een vuistregel van Koolen en Kuipers (1983) gelijk genomen aan 1,2 maal de banddruk. Voor lage banddrukken (minder dan 100 kPa c.q. 1 bar) gaat deze vuistregel niet meer op, maar in deze studie zijn bij alle maatgevende wiellasten de banddrukken hoger dan 100 kPa (1 bar). Bij zeer hoge banddrukken gaat de vuistregel ook niet op, omdat de band zo hard wordt dat deze zich gaat gedragen als een massief onvervormbaar wiel. De band vervormt dan nauwelijks en plat niet af, maar spoort zover in totdat voldoende contactoppervlakte is gecreëerd om de wiellast te dragen. De contactdruk wordt dan niet meer door de bandspanning en stijfheid van de band bepaald, maar door de maximale contactdruk die de grond kan hebben. We hebben enigszins arbitrair een maximale gemiddelde contactdruk van 300 kPa aangehouden. In Figuur 1 is voor een 105 cm brede band 1050/50R32 met een wiellast van 8,2 ton en een banddruk van 120 kPa (1,2 bar) de in SOCOMO ingevoerde bodemdrukverdeling gegeven. De wiellast drukt in het spoor en grijpt dus op spoordiepte aan. Voor de spanningsberekeningen werd een spoordiepte van 2,5 cm aangenomen. Bedacht moet worden dat bij het ploegen met een voor- en achterwiel in de open voor wordt gereden, rechtstreeks op de ondergrond. Daarom grijpt bij het ploegen de wiellast in SOCOMO aan op ploegdiepte. Vooral bij een kleigrond is de benodigde trekkracht voor het ploegen groot. Door de achterband van de tractor wordt daardoor naast een grote verticale kracht ook een grote horizontale kracht in het contactvlak band – ondergrond uitgeoefend. SOCOMO kan behalve verticale ook horizontale wiellasten aan, zodat ook met deze grote horizontale wiellast wordt gerekend.



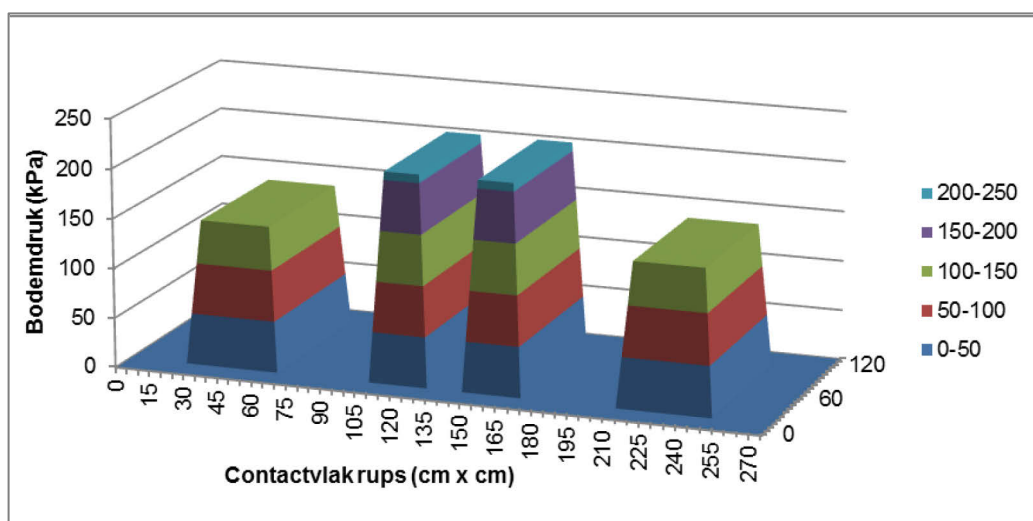
Figuur 1. Invoer SOCOMO: Verticale bodemdruk in het contactvlak band – bodem onder een band 1050/50R32 met een wiellast van 8,2 ton en een banddruk van 120 kPa (1,2 bar).

Tegenwoordig worden onder suikerbietrooiers en aardappelrooiers ook rubber rupsen in plaats van banden gebruikt. De machines zijn dan zo gebouwd dat op de as met rupswielen zeer hoge lasten worden afgesteund. In Figuur 2 is een voorbeeld gegeven van de afmetingen van een dergelijk rupswiel.



Figuur 2. Rubber rupswiel zoals deze wordt gebruikt onder aardappelrooiers en bietenrooiers ter vervanging van wielen met banden in verband met de zeer hoge aslasten (per rupswiel ca. 16 ton).

Bedacht moet worden dat de bodemdruk onder een rups niet gelijkmatig is, maar juist onder de keer- en aandrijfwielen en de rollen een duidelijk piek vertoont (Arvidsson *et al.*, 2011; Keller *et al.*, 2002; Van den Akker, 2003). Deze pieken zijn tot in de ondergrond merkbaar in de grondspanningen. In Figuur 3 zijn de bodemdrukken onder een dergelijke rubber rups aangegeven, zoals deze in SOCOMO worden ingevoerd.



Figuur 3. Invoer SOCOMO: Verticale bodemdruk in het contactvlak rups – bodem onder een rups 1832 x 890 met een belasting van 16,5 ton.

Het model SOCOMO berekent per diepte-interval tot een te kiezen diepte alle grondspanningen onder een wiel of rups in een verticale lengte- of dwarsdoorsnede in de grond. In dit project is gekozen voor een diepte-interval van 2,5 cm tot een grootste diepte van 50 centimeter. Onder banden zijn de grondspanningen in een dwarsdoorsnede berekend en onder de rups in een lengtedoorsnede, zodat elke piekspanning onder een keerwiel of rol kon worden berekend. Voor de vergelijking van de typerende grondspanningen in 1980 en 2010 zijn de piekspanningen op diepten van 25, 40 en 50 cm onder maaiveld beschouwd. De piekspanningen zijn het meest relevant om de kans op verdichting van de ondergrond te schatten omdat deze bepalen of een bepaalde ondergrond zal bezwijken of niet. De diepte van 25 cm geeft ongeveer de diepte waar bij kleigronden de ploegzool is gesitueerd. NB bij lichte gronden kan dit dieper zijn, namelijk tot 35 cm diepte. De diepten van 40 en 50 cm zijn gekozen omdat verschillende onderzoekers aangeven dat onder deze diepten de verdichting als permanent kan worden beschouwd (o.a. Etana & Håkansson, 1994, Håkansson & Reeder, 1994, Schjøning *et al.*, 2012).

3. Wiellasten en banddrukken van landbouwmachines in 1980 en 2010

3.1 Trekkers

Trekkers worden in combinatie met werktuigen gebruikt om veldwerkzaamheden uit te voeren. In 2010 zijn dat vooral transportwerkzaamheden met landbouwwagens en mesttanks en veldwerk zoals ploegen, de zaaibereiding, bemesten met dierlijke mest, gewasverzorging en gras oprapen. In 1980 werden trekkers nog op grote schaal gebruikt voor de aandrijving van oogstwerktuigen voor aardappelen en bieten.

Omdat vooral de combinatie van trekker en werktuig interessant is in verband met bodemverdichting en omdat er voor verschillende werkzaamheden ook verschillende trekkers gebruikt worden is voor trekkers volstaan om de gegevens te verzamelen die nodig zijn om bij de gekozen typerende trekker- werktuigcombinaties de aslasten te kunnen berekenen. Voor de trekkers uit 1980 werd een deel van de gegevens bepaald afhankelijk van de vermogensklasse van de trekker (Tabel 2). Hiervoor werd regressieanalyse toegepast op de gegevens van 168 trekkers met motorvermogens van 35 tot 138 kW, zoals gegeven door Hoenderken *et al.* (1980).

Ook voor de trekkers uit 2010 werd regressieanalyse toegepast op de gegevens van 113 trekkers met motorvermogens van 74 tot 287 kW, zoals gegeven in het trekkerjaarboek 2009 (Van der Meer *et al.*, 2008) om de leeggewichten en wielbasis voor de verschillende vermogensklassen in te schatten. De overige maten en gewichten berusten op schattingen.

Tabel 2. *Typerende leeggewichten, afmetingen en bandenmaten van trekkers in 1980 en 2010 t.b.v. berekeningen van de gewichtsoverdracht bij trekker-werktuig combinaties.*

Jaar	Motorvermogen (kW)	Lege massa (kg)	Achteraslast (kg)	Wielbasis (m)	Afstand achter achteras			Bandenmaat	
					trekhaak (m)	zwaaihaak (m)	kogels (m)	standaard	optie
1980	40	2620	1620	2,20	0,35	0,70	0,86	12.4-36	13.6-38
	80	4700	2910	2,57	0,35	0,70	0,95	16.9-38	18.4-38
	100	5740	3560	2,75	0,35	0,70	1,00	18.4-38	20.8-38
	120	6780	4200	2,93	0,35	0,70	1,05	20.8-38	
2010	80	4800	2880	2,58	0,35	0,70	0,95	16.9R38	600/65R38
	140	6820	4090	2,78	0,35	0,70	1,15	20.8R38	650/65R38
	180	8160	4900	2,91	0,35	0,70	1,25	650/65R42	710/70R42
	240	10180	6110	3,11	0,35	0,70	1,35	710/70R42	800/70R42

Een topmodel trekker in 1980 was een 120 kW FWD trekker met een onbelast gewicht van 6400 kg. Het maximale gewicht van een werktuig in de hefinrichting was 3500 kg, waarmee de achteraslast maximaal ca. 9900 kg bedroeg. De grootste 'standaard' trekkerachterbanden waren toen 20.8R38 banden. Voor een aslast van 9900 kg was bij 30 km/uur op de weg een banddruk van 270 kPa nodig. Centrale banddrukregelsystemen waren er toen nog niet. Als de achteras op de weg maximaal belast werd (bijvoorbeeld door een zwaar werktuig in de hefinrichting), werd de daarvoor benodigde hoge banddruk ook op het veld toegepast, hoewel de druk bij lage snelheid op het veld volgens de fabrikanten terug kon naar 160 kPa. Als de trekker alleen in het veld zwaar belast werd (bijv. bij kunstmest strooien) kon de trekker ook op de weg met 160 kPa banddruk rijden en werd 160 kPa de maatgevende bodemdruk.

In 2010 is het motorvermogen van een topmodel trekker verdubbeld naar 240 kW en is het onbelaste gewicht ongeveer 10180 kg. Technisch kan de achteraslast 13000 kg bedragen, maar op de openbare weg is wettelijk maar 11500 kg toegestaan. Dezelfde redenering als voor 1980 is ook aangehouden om de maatgevende bodemdruk in 2010 te bepalen.

Als CTIS aanwezig is en gebruikt wordt, kan in het veld altijd met de laagst mogelijke banddruk gewerkt worden (150 kPa bij 13000 kg aslast en 800/70R38 banden). Door toepassing van rubber rupsbanden is een aanzienlijke verlaging van de gemiddelde bodemdruk mogelijk. Deze waren er nog niet in 1980. In 2010 worden ze al op een aantal trekkers toegepast, zowel met 4 rupsen als vervanging van de wielen op wieltrekkers en met 2 lange rupsen op rupstrekkingen. Ombouwrupswielen, ter vervanging van wielen met banden zijn er tot 12 ton draagvermogen, waarbij de gemiddelde bodemdruk niet hoger is dan maximaal 110 kPa (Vermeulen en Verwijs, 2007). De contactlengte van ombouwrupswielen varieert van 1,20 m tot 2,55 m en de breedte van 0,3 m tot 0,92 m. Ook bij rups-trekkingen blijven de bodemdrukken in het algemeen zeer laag.

3.2 Ploegen

In 1980 werden in Nederland hoofdzakelijk 2- en 3-schaar wentelploegen gebruikt en ook rondgaande ploegen met 3 tot 5 scharen. Typerend voor het topsegment in 1980 was de 4 schaar wentelploeg met een werkbreedte van 1,60 m (Figuur 4). De gangbare ploegdiepte was ca. 25 cm. De gemiddelde massa van vierschaar wentelploegen uit 1980, inclusief voorscharen en kouters, was 1170 kg (Tabel 3). Om deze ploeg ook onder zwaardere omstandigheden te kunnen trekken was niet zozeer veel motorvermogen nodig, maar wel een trekker met voldoende massa om de benodigde trekkracht op de grond te kunnen overbrengen. Daarom werden toch trekkers met relatief veel vermogen gebruikt. Hier is ervan uitgegaan dat er een 100 kW trekker gebruikt werd voor deze ploegen. Om tijdens het ploegen voldoende trekkracht op de grond over te kunnen brengen werd gebruik gemaakt van overdracht van de verticale krachten die op de ploeg werken op de achteras van de trekker en daarmee ook gewichtsoverdracht van de vooras naar de achteras. Vaak waren frontgewichten op de trekker noodzakelijk om voldoende vooraslast te behouden voor de besturing van de trekker. De as met de grootste aslast is bij het ploegen dus de achteras van de trekker, die ook praktisch alle trekkracht moet opbrengen. Door de schuinstand van de trekker komt ca. 70% van de achteraslast terecht op het wiel dat in de open voor loopt en dit wiel kan ook de meeste trekkracht leveren omdat de bodem op die diepte vaak minder nat is dan aan maaiveld. Uitgaande van kleigrond met een specifieke ploegweerstand van 70 kN/m² is de trekkrachtbehoefte van een vierschaar ploeg 28 kN. De trekkrachtcoëfficiënt van vochtige kleigrond is ca. 0,45 (Vermeulen, 1975; Kouwenhoven en Vermeulen, 1977). Als we stellen dat de volledige trekkracht door de achteras wordt opgebracht is de benodigde achteraslast 6220 kg, waarvan 70% (4350 kg) op het wiel in de ploegvoor. Wegens de hoge trekkracht moeten in de bandentabellen de cijfers voor 30 km/uur aangehouden worden. Bij de standaardband op een 100 kW trekker, een 18.4-38 band, was dan de benodigde banddruk voor het achter wiel in de ploegvoor tijdens het ploegen ca. 270 kPa. Voor zandgrond, met een specifieke ploegweerstand van 35 kN/m², was veel minder trekkracht en dus ook gewichtsoverdracht op de trekkerachterwielen nodig, zodat de last op het wiel in de voor 2177 kg was, waarvoor een banddruk van 100 kPa voldoende was. Transport over de weg gebeurde met de ploeg in de hefinrichting, zonder steunwielen. Hierbij was de wiellast 2890 kg en de minimaal benodigde banddruk bij 30 km/u was ca. 160 kPa. De benodigde banddruk tijdens het ploegen was dus maatgevend op kleigrond en die tijdens het transport was maatgevend op zandgrond.

In 1980 werden er geen bredere banden dan de 18.4-38 voor het ploegen gebruikt omdat deze als te breed voor de ploegvoor werden beschouwd. Omdat er geen banden met een grotere diameter waren, waren er geen reële lagedruk opties.

Wat in 1980 het topsegment was, is in 2010 de meest gebruikte en verkochte ploeg: de vierschaar wentelploeg (Knuivers, 2009). Wat opvalt, is dat de vierschaar wentelploegen wel geavanceerder zijn geworden en daardoor bijna 400 kg zwaarder dan in 1980. Typerend voor het topsegment ploegen in 2010 is een 6 schaar wentelploeg, getrokken door een 150 kW trekker (Figuur 4). De totale werkbreedte van deze ploeg is 2,40 m. Omdat de breedte van de ploegvoor niet wezenlijk toegenomen is, worden voor het gangbare ploegen met een zesschaar wentelploeg geen trekkerbanden met grote breedte gebruikt, maar wel met de grootst verkrijgbare diameter. Vergeleken met

1980 is de diameter aanzienlijk toegenomen van ca. 1,75 m tot 2,05 m. De bandenmaat 520/85R46 is de breedste die voor het ploegen geaccepteerd is (Sleutel, 2012), hoewel bij een recente test van vierschaarploegen door Michelin 580/70R38 banden op de achteras gemonteerd werden. Voor de schatting van de typerende trekker-achteraslast en de benodigde banddruk (Tabel 3) is toepassing van de 520/85R46 band aangenomen. Tijdens het ploegen is de benodigde achteraslast weer berekend uit de trekkrachtbehoefte en de trekkrachtcoëfficiënt. Dit leidt tot een wiellast van 6530 kg voor kleigrond en 3215 voor zandgrond. Transport over de weg gebeurt nog steeds zonder steunwielen voor transport. Rekening houdend met een gemiddeld ploeggewicht van 2000 kg en een afstand van zwaartepunt ploeg tot achteras trekker van 2,5 meter wordt de achteraslast van een 150 kW trekker met geheven ploeg ca. 8920 kg en de wiellast 4460 kg. Omdat de wiellast tijdens ploegen op kleigrond erg hoog is moet een stijvere band (met load index 170) gekozen worden dan op zandgrond (load index 155). De benodigde banddrukken voor deze banden werden opgezocht in de categorie 10 km/uur, high traction voor het ploegen en bij 30 km/u voor het transport over de weg (Tabel 3).

Een reële bodemvriendelijke optie bij ploegen met een zesschaar ploeg in 2010 is het bovenoverploegen. Hierbij wordt niet met twee wielen in de ploegvoor gereden, maar wordt met alle trekkerwielen op maaiveld gereden en de ploeg hangt recht achter de trekker. Deze optie is ten opzichte van 1980 aantrekkelijker geworden doordat de ploegbreedte vanaf 6 scharen (met breedteverstelling) groter is dan de trekkerbreedte en omdat met RTK-DGPS besturing van de trekker nu precies aangesloten kan worden op de vorige werkgang. Wat betreft bodemverdichting heeft deze wijze van werken een aantal voordelen (Sleutel, 2012):

- De wielen rijden op het maaiveld, zodat de krachten van het wiel niet meer direct op de ondergrond (in de ploegvoor) afsteunen,
- Er kunnen bredere banden worden toegepast dan bij ploegen door de voor,
- Het is beter mogelijk om ook de voorwielen van de trekker te betrekken bij het leveren van trekkracht.

Bij bovenover ploegen is het risico op slip groter dan wanneer door de voor wordt gereden. Dit betekent een lagere trekkrachtcoëfficiënt. Gewasresten en natte en/of versmeerde grond zijn daarvan de oorzaak. Ook lukt de gewichts-overdracht minder goed, doordat de hefarmen in een lagere positie hangen dan wanneer je met een wiel door de voor rijdt. Om deze beide factoren te compenseren, verzwaren veel 'bovenover-ploegers' de trekker met frontgewichten, wielgewichten of vloeistof in de banden. Voor de bepaling van aslasten en banddrukken bij bovenoverploegen (Tabel 3) is ervan uitgegaan dat de achteras van de trekker met 710/70R42 banden 70% van de trekkracht moet kunnen leveren bij een tractiecoëfficiënt van 0,35 (nat bietenland) en dat dit bereikt is door middel van frontgewichten op de trekker. Bij 710/70R42 banden wordt de totale breedte van ploeg veresteld tot 2,60 m, zodat even breed geploegd wordt als de breedte van de trekker. De benodigde trekkrachtlevering door de achteras wordt dan 3180 kg op klei en 1590 kg op zand. Bij een tractiecoëfficiënt van 0,35 zijn de benodigde achteraslasten dan respectievelijk 9100 kg en 4550 kg en de wiellasten 4550 kg en 2275 kg.



Figuur 4. Vierschaar trekker-ploeg combinatie uit 1980 (links) en een 6 schaar combinatie 2010 waarmee zowel door de voor als bovenover geploegd kan worden (rechts).

Rekening houdend met een gemiddeld ploeggewicht van 2200 kg en een afstand van zwaartepunt ploeg tot achteras trekker van 2,5 meter wordt de achteraslast van een 150 kW trekker met geheven ploeg ca. 9380 kg en de wiellast 4690 kg. De benodigde banddrukken (Tabel 3) werden opgezocht in de categorie 10 km/uur, high traction voor het ploegen en bij 30 km/u voor het transport over de weg.

Tabel 3. Typerende wiellasten en banddrukken voor de trekkerachteras bij ploegen in 1980 en 2010.

Jaar	Typerende combinatie in het topsegment	Benodigde trekkracht ¹ (kN)	Wiellast in het veld ² (kg)	Wiellast op de weg (kg)	Achterbanden	Bandbreedte (cm)	Benodigde banddruk ³ (kPa)	
							Veld	Weg
1980	100 kW trekker met vierschaar wentelploeg	Klei: 28	4350	2890	18.4-38	43	270	160
		Zand: 14	2175	2890	18.4-38	43	100	160
2010	150 kW trekker met zesschaar wentelploeg	Klei: 42	6530	4460	520/85R46 ⁴	54	270	200
		Zand: 21	3215	4460	520/85R46	54	100	160
2010	150 kW trekker, zesschaar wentelploeg, bovenover	Klei: 45	4550	4690	710/70R42	72	100	100
		Zand: 23	2275	4690	710/70R42	72	60	100

¹ Op kleigrond met specifieke ploegweerstand van 70 kN/m² en op zandgrond 35 kN/m².

² Bodembelasting op 25 cm diepte bij door de voor ploegen en bovenop maaiveld bij bovenover ploegen.

³ 1980: 30 km/uur. 2010: 10 km/u en high traction (HT) in het veld; 30 km/u op de weg.

⁴ Relatief stijve band (load index 170) voor klei en relatief soepele band (load index 155) voor zand.

3.3 Gewasbescherming

In 1980 werd de gewasbescherming bijna uitsluitend uitgevoerd met machines met smalle banden die tussen de gewasrijen pasten. Om zo weinig mogelijk schade aan het gewas toe te brengen werden steeds dezelfde, smalle spuitsporen gebruikt. Dit leidde vaak tot diepe sporen waarin water bleef staan. Door landbouwers werden voor de gewasbescherming voornamelijk gedragen veldspuiten gebruikt met een spuitboombreedte tot 24 meter en een tankinhoud tot 1000 liter. Hierbij werd dan een "spuittrekker" gebruikt die op smalle banden stond. Voor gewassen op 75 cm rijafstand werden meestal 9.5" (24 cm) en ook 11.2" (28 cm) brede rijencultuurbanden gebruikt en voor gewassen op 50 cm zelfs wel 8.3" (21 cm) brede banden. Door grote bedrijven en loonwerkers werden voornamelijk zogenoemde opbouwspuiten gebruikt, dat wil zeggen een zelfrijdende spuit (tot 30 meter spuitboombreedte) met als basis een trekkerchassis. De tankinhoud op deze zelfrijders was meestal ca. 2000 liter, maar ook modellen met 3500 liter tank kwamen voor. Bekend waren de Allaeyts en Delvano spuiten op basis van een Ford trekker en de spuiten van Hoegen Dijkhof, opgebouwd op een Mercedes MB Trac of een Unimog. Deze opbouwspuiten zijn als het topsegment in 1980 beschouwd met als typerende tankinhoud 2000 liter (Tabel 4). Op deze spuiten werden standaard ca. 12.5" (32 cm) brede banden gemonteerd. De wiellasten op de spuiten met 3500 liter tanks waren ongeveer 3000 kg. Zelfs met 13.6" (35 cm) brede banden was daarvoor een banddruk van ca. 420 kPa nodig. Het laatste wordt echter niet als typerend voor het topsegment spuiten in 1980 gezien.

Omdat de rijafstand van het gewas beperkend was voor de bandbreedte die toegepast kon worden en daarmee voor de capaciteit van de machine is men ertoe over gegaan om te spuiten vanaf zogenoemde spuitpaden. Hierbij wordt bewust een klein areaal van het gewas opgeofferd om met bredere banden te kunnen rijden. Bij een aantal gewassen wordt er over de planten heen gereden, zoals bij graan en bieten en bij aardappelen worden twee ruggen vlak gemaakt om als spuitpad te dienen. In 2010 zijn spuitpaden algemeen ingevoerd en mede als gevolg daarvan zijn getrokken spuiten en zelfrijders met een hogere capaciteit dan in 1980 nu algemeen in gebruik. Kenmerkend voor het topsegment veldspuiten zijn de getrokken spuit met een spuitboombreedte van 36 m en een 5000 liter tank en

de zelfrijdende spuit met een spuitboombreedte van 48 meter en een 5000 liter tank. Als standaardband onder de spuiten is de 520/85R42 band te beschouwen, maar bredere banden zijn mogelijk. In Tabel 4 zijn de typerende wiellasten en benodigde banddrukken voor de getrokken veldspuiten en de zelfrijders voor het topsegment 2010 weergegeven. Centrale banddrukregelsystemen worden op veldspuiten niet toegepast, maar zouden de banddruk in het veld aanzienlijk kunnen verlagen. Op het moment zijn echter de benodigde banddrukken bij volle tank op de weg ook te beschouwen als typerend voor de spuitmachines in het veld.

Tabel 4. *Typerende wiellasten en banddrukken bij de gewasbescherming in 1980 en 2010.*

Jaar	Typerend voor het topsegment machines	Typerende as	Maximale wiellast (kg)		Bandmaat	Band-breedte (cm)	Benodigde banddruk ¹ (kPa)	
			Veld	Weg			Veld	Weg
1980	Veldspuit, vast opgebouwd op trekkerchassis, boombreedte 24 m en tankinhoud 2000 l.	Trekkeras achter	1875	1875	12.4 - 28	31	190	265
2010	Getrokken veldspuit, boombreedte 36 m en tankinhoud 5000 l.	Sputas	3630	3630	520/85R42	53	70	130
2010	Zelfrijdende veldspuit, boombreedte 48 m en tankinhoud 5000 l.	Voor- en achteras	4100	4100	520/85R42	53	90	160

¹ 10 km/u en low traction (LT) in het veld; 30 km/u op de weg in 1980; 40 km/u op de weg in 2010.

3.4 Transport van akkerbouwproducten

Typerend voor het topsegment landbouwwagens in 1980 was een wagen met een tandemas en een laadvermogen van 16 ton (Figuur 5; Tabel 5). Bij een oplegdruk van ca. 2000 kg was de maximale wiellast gemiddeld ca. 4600 kg, tegen de grens aan van wat op de weg toegestaan is. Er waren destijds nog slechts enkele wagens met 3 assen en hogere laadvermogens in gebruik. De meeste 16 tons wagens waren uitgerust met 51 cm brede 20.0/70-20 (16 PR) wagenbanden of 34 tot 46 cm brede vliegtuigbanden. De minimaal benodigde banddruk op de weg (30 km/u) was bij de 20.0/70-20 banden ca. 250 kPa. Wagenbanden werden zo stijf gemaakt (hoge ply rating), dat hoge banddrukken op de weg mogelijk waren. De vliegtuigbanden waren nog stijver met banddrukken veel hoger dan 250 kPa. Om schade aan de banden te voorkomen waren bij lagere snelheden drukken lager dan 150 kPa niet toelaatbaar. Mede daardoor was er nauwelijks een relatie tussen de minimaal benodigde banddruk in het veld en de druk die op de bodem werd uitgeoefend. In 1980 waren banddrukregelsystemen (CTIS) nog niet voor de landbouw beschikbaar en werd de druk die op de weg nodig was ook in het veld gebruikt.

Door vergroting van de capaciteit en bunkerinhoud van maaidorsers en bunkerrooiers was er ook behoefte aan vergroting van de capaciteit van de landbouwwagens. De ontwikkelingen met spuitpaden en meer bunkerrooiers voor aardappelen en bieten maakte ook dat de wagenbanden niet meer tussen de gewasrijen hoefde te passen en dat de spoorbreedte van wagens niet meer 150 cm hoefde te zijn (Hoenderken, 2009). Daardoor kon de spoorbreedte en de stabiliteit van de wagens vergroot worden, waardoor weer betere banden (radiaal, breder en grotere diameter) toegepast konden worden. Omdat de grens van de toegestane wiellast op de weg (5000 kg) al bijna bereikt werd bij de 16 tons wagens met tandemas werden de wagens met drie assen uitgerust. Mede omdat ook de trekkers zwaardere werden steeg de oplegdruk tot ongeveer 4000 tot 4500 kg. Praktisch alle wagens worden nu volgens de wensen van de klant gemaakt.

Anno 2010 is een drieassige landbouwwagen met een laadvermogen van 25 tot 30 ton typerend voor het topsegment (Figuur 5 en Tabel 5). Bij volledige belading is de maximale wiellast gemiddeld 5000 kg bij de 25 tons wagen en gemiddeld 6250 kg bij de 30 tons wagen. Omdat de wiellast op de weg niet hoger mag zijn dan 5000 kg kan daar bij de 30 tons wagen wel het maximale laadvermogen qua inhoud, maar niet qua gewicht benut worden. Op het veld, zoals bij de oogst van suikerbieten, kan wel het volledige laadvermogen wat betreft het gewicht benut worden. Wagenbanden met 22.5 inch velgdiameter worden in 2010 bijna niet meer toegepast. 26,5 inch is nu de standaard, en steeds vaker worden ook 30.5 inch velgen toegepast. Op dit moment worden op de wagens in het topsegment veel 650/55R26.5 banden toegepast. Bij 5000 kg wiellast is hierbij op de weg 190 kPa banddruk nodig en op het veld 130 kPa. Bij 6250 kg wiellast is op het veld is een banddruk van 170 kPa nodig. Op landbouwwagens is CTIS nu vrijwel altijd als optie beschikbaar. Volgens de fabrikanten wordt CTIS echter maar beperkt geleverd en, indien aanwezig, wordt het niet altijd gebruikt, tenzij de omstandigheden moeilijk zijn (Peecon, pers. communicatie).

Tabel 5. *Typerende wiellasten en banddrukken bij het transport met landbouwwagens in 1980 en 2010.*

Jaar	Typerend voor het topsegment machines	Typerende as	Maximale wiellast (kg)		Bandmaat	Bandbreedte (cm)	Benodigde banddruk ¹ (kPa)	
			Veld	Weg			Veld	Weg
1980	16 tons wagen met tandemas achter 80 kW trekker	Wagenassen	4600	4600	20.0/70-20 (16PR)	53	150 ²	250
2010	25 tons drie-assige wagen achter 150 kW trekker 30 tons drie-assige wagen achter 150 kW trekker	Wagenassen	5000	5000	650/55R26.5	64	130	190
			6250	5000	650/55R26.5	64	170	190

¹ 10 km/u in het veld; 30 km/u op de weg in 1980; 40 km/u op de weg in 2010.

² Stijve band, lagere druk niet toelaatbaar.



Figuur 5. *Transport van akkerbouwproducten met een 16 tons tandemas kipwagen in 1980 (links) en een 25 tot 30 tons tridemass kipwagen in 2010 (rechts).*

3.5 Transport bij de voederwinning

Bij gras wordt het gewas gemaaid en, na droging tot het gewenste vochtgehalte, op een zwad geharkt. Het op zwad liggende gras, voorgedroogd gras om in te kuilen of hooi werd in 1980 in het algemeen verzameld en vervoerd met wagens die een opraapmechanisme hadden (opraapwagens), eventueel gecombineerd met een snijmechanisme om het gras te verkleinen (opraapsnijwagens) en met een doseermechanisme om het voer op de rijkuil te verdelen of voor de dieren neer te leggen (opraapdoseerwagens). Door het lage soortelijk gewicht van de producten werden wagens met een relatief groot volume en een relatief laag laadvermogen gebruikt. Om zoveel mogelijk product mee te kunnen nemen werd het (voorgedroogd) gras en hooi vaak enigszins samengeperst in de wagen. Wat betreft de bodembelasting door deze wagens zijn we er van uitgegaan dat de wagens tot aan het opgegeven laadvermogen (in kilogrammen) beladen werden. Daarbij varieerden de maximale wiellasten van ca. 1200 tot 3100 kg. Typierend voor het topsegment van deze machines in 1980 is een opraapsnijwagen (Figuur 6) met een laadvermogen van 7800 kg, een inhoud van de vaste laadbak van ca. 15 m³ en van de laadbak met hooiopbouw 28 m³, equivalent met 42 m³ niet samengeperst hooi (Tabel 6).

Voor het transport van gehakselde maïs werden in 1980 voornamelijk landbouwwagens gebruikt. Daartoe werden de wagens vaak voorzien van opzetstukken om het laadvolume te vergroten en zo het laadvermogen van de wagen goed te kunnen benutten met een relatief licht product als gehakselde maïs. Voor de bodembelasting door landbouwwagens wordt verwezen naar paragraaf 3.4.

In 2010 is het laadvermogen en het volume van de wagens voor de voederwinning aanzienlijk toegenomen ten opzichte van 1980. De wagens die nu lopen zijn veelal tandemassers of tridemassers met zodanige laadvermogens dat de wiellast ca. 5 ton is, overeenkomend met de maximum toegestane aslasten op de openbare weg. De opraapsnijwagens die in 2010 gebruikt worden zijn voor een groot deel zogenoemde dubbeldoelwagens, die zowel voor winning van kuilgras (gesneden of gehakseld) als voor het transport van snijmaïs gebruikt worden. Hierbij blijft bijvoorbeeld de opraap-snij unit voor gras omhoog geklapt en wordt een staalplaat gemonteerd boven de rotorinvoer zodat geen snijmaïs verloren wordt. Behalve de dubbeldoelwagens worden ook wel speciale silagewagens voor het transport van snijmaïs gebruikt, waarbij de wiellasten en gebruikte bandenmaten overeenkomen met die van de dubbeldoelwagens. Als typerend voor het topsegment van de wagens voor de voederwinning in 2010 zijn in Tabel 6 de gegevens opgenomen van een dubbeldoelwagen met tridemas en een laadvermogen van 21 ton (Figuur 6).

Tabel 6. *Typerende wiellasten en banddrukken bij wagens voor transport van voedergewassen in 1980 en 2010.*

Jaar	Typerend voor het topsegment machines	Typerende as	Maximale wiellast (kg)		Bandmaat	Band-breedte (cm)	Benodigde banddruk ¹ (kPa)	
			Veld	Weg			Veld	Weg
1980	Opraapsnijwagen, tandemas, 7,8 ton laadvermogen, 40 kW trekker	Wagenassen	2410	2410	13.5x15 ² (8PR)	34	310	310
2010	Dubbeldoelwagen, tridemas, 21 ton laadvermogen, 140 kW trekker	Wagenassen	4500	4500	710/50R26.5	71	120	180

¹ 10 km/u en low traction (LT) in het veld; 30 km/u op de weg in 1980; 40 km/u op de weg in 2010.

² Onvoldoende gegevens voor deze band; banddrukgegevens van Vredestein 13.5/75-17 band gebruikt.



Figuur 6. Topsegment machines voor transport bij de voerderwinning: in 1980 een opraapwagen met ca. 8 ton laadvermogen (links) en in 2010 een tridemas dubbeldoelwagen met ongeveer 21 ton laadvermogen (rechts).

3.6 Mest toedienen

De mesttoediening werd in 1980 nog grotendeels gedaan met boerenmachines met een ketsplaat aan de achterzijde van een mesttank, waarmee de mest bovengronds verspreid werd. Typerende apparatuur voor de toediening op grasland was een trekker met een mesttank van 6 m³ voor het bovengronds verspreiden van vloeibare dierlijke mest. De wiellast daarbij was maximaal ca. 3000 kg. Vaak werden relatief smalle, stijve banden toegepast, waarbij banddrukken van 300 tot 500 kPa nodig waren. Op bouwland werd iets meer gelet op de banduitrusting dan op grasland, maar ook daar was de benodigde banddruk meestal ca. 300 kPa. Het topsegment van de mesttoediening apparatuur in 1980 bestond uit enerzijds getrokken tandemas mesttanks met een inhoud van 10 tot 12 m³, terwijl door loonwerkers ook al de eerste zelfrijdende bemesters van Veenhuis (Terberg onderstel aangevuld met Veenhuis componenten) en Kurstjens (gebouwd door Werklust uit Apeldoorn) gebruikt werden. De verschillen in banduitrusting voor de topsegment machines waren groot, variërend van uiterst stijve vliegtuigbanden tot relatief soepele banden. Als typerend voor het topsegment is in Tabel 7 een mesttank van 12 m³ met middelmatig stijve banden opgenomen (Figuur 7). Van de zelfrijders was onvoldoende informatie over aslasten en banddruk voorschriften bekend om in de tabel op te nemen.

In 2010 is mesttoediening om diverse redenen grotendeels een loonwerkactiviteit geworden. Nog steeds worden getrokken mesttanks gebruikt, maar nu met aangebouwde zodenbemester of bouwlandinjecteur. In het algemeen is de maximum wiellast ca. 5000 kg omdat de tanks ook voor transport over de weg gebruikt worden. Voor toepassing waarbij de machine vooral in het veld gebruikt wordt kan de wiellast wat hoger liggen (ca. 6500 kg). Uitzonderingen daargelaten is de tankcapaciteit van enkelassers maximaal 14 m³, van tandemassers maximaal 22 m³, van tridemassers maximaal 32 m³ en van vierassers 36 m³. Een aantal merken leveren enkelasuitvoeringen met vier banden naast elkaar om de bodemdruk te verlagen en anderen hebben voorzieningen om wielen niet in hetzelfde spoor te laten rijden (hondegang of uitschuifassen). Bij de zelfrijdende machines en bij aanvoer van mest naar de bemester via een sleepslang wordt de mest vrijwel altijd aangevoerd met transporttanks of vrachtwagens. De bemesters worden dan via een tussenopslag aan de rand van het veld beladen. De tankcapaciteit bij de zelfrijders varieert bij de drie- en vierwielaars van 14 tot 19 m³. Daarnaast zijn 3-assige uitvoeringen leverbaar door toepassing van een aanhanger of oplegger met een capaciteit van 18 tot 25 m³. De aslasten bij volle tank zijn bij de zelfrijders meestal veel hoger dan de op de weg toegestane 12 ton en de benodigde banddruk in het veld is dan bepalend.

Tabel 7. *Typerende wiellasten en banddrukken bij de mesttoediening in 1980 en 2010.*

Jaar	Typerend voor het topsegment machines	Typerende as	Maximale wiellast (kg)		Bandmaat	Bandbreedte (cm)	Benodigde banddruk ¹ (kPa)	
			Veld	Weg			Veld	Weg
1980	Mesttank, 12 m ³ , tandemas, met ketsplaat	Tankassen	3500	3500	16.0/17-20 (16 PR)	41	230	320
2010	Mesttank, 26 m ³ , tridemas met zodenbemester of bouwlandinjecteur	Tankassen	5600	5000	650/55R26.5	63	140	190
2010	Zelfrijder, 19 m ³ , 2 assen met zodenbemester of bouwlandinjecteur, hondegang	Beide assen	8200	3400 leeg	1050/50R32	105	120 (cycl)	100 leeg (240 vol)
2010	Trekker, aanvoersleepsling, zodenbemester, werkbreedte: 12 m	Trekker-achteras	5400 ² (cycl)	5400	900/50R42	90	80 (cycl)	140

¹ 10 km/u en low traction (LT) in het veld; 30 km/u op de weg.

² Kort cyclische belasting: 5400 bij draaien met geheven bemester, veel lager tijdens bemesten.



Figuur 7. *Tandemas 12 m³ mesttank voor gebruik met een ketsplaat-verspreider uit 1980 (linksboven), tridemas mesttank met bemester (2010, rechtsboven), zelfrijdende bemester in hondegang (2010, linksonder) en bemester met sleepslangaanvoer (2010, rechtsonder).*

De meest bodemvriendelijke bemestervariant met hoge capaciteit is een trekker met zodenbemester in de hef-inrichting, waarbij de mest via een sleepslang vanaf de rand van het veld naar de trekker wordt gepompt. Met deze machine kan mest toegediend worden met in de achterbanden van de trekker een druk van ca. 80 kPa.

Evenals bij de landbouwwagens is de keuze aan modellen en uitvoeringen groot en wordt bijna elke machine in 2010 klantspecifiek gemaakt. Uit dit aanbod in 2010 zijn weer enkele machines gekozen die typerend zijn voor het topsegment van de in Nederland gebruikte machines (Tabel 7; Figuur 7): 1) een combinatie van trekker met een tridemas mesttank van 18 m³ met aanbouw zodenbemester; 2) een 4-wielige zelfrijdende bemester met 19 m³ mesttank en een zodenbemester en 3) een trekker met aanvoersleepslang en zodenbemester. De laatste machine wordt in combinatie met een zodenbemester toegepast op zowel grasland als kleibouwland (voorjaarstoediening) en in combinatie met een bouwlandinjecteur op zandgrond.

3.7 Maïs en gras hakselen

Voor de voederwinning worden maïs, gras en een aantal andere gewassen op het veld gehakseld, naar het bedrijf getransporteerd en daar ingekuild of verwerkt. De veldhakselaars kunnen uitgerust worden met een maïsvoorzetstuk, zwadopraep voor gras of de maaivoorzetstukken voor gehele plant silage (GPS) van o.a. granen.

In 1980 werd maïs vrijwel uitsluitend gehakseld met een veldhakselaar met 3 of 4 rijig maïsvoorzetstuk en een motorvermogen van ca. 180 kW. Het gehakselde product werd direct afgevoerd naar een naastrijdende trekker met wagen. Als typerend voor het topsegment werd gekozen voor een 4 rijige veldhakselaar met een motorvermogen van 171 kW en een relatief hoog totaalgewicht van 8300 kg. De maximale aslast was 5000 kg op de vooras (Tabel 8) en de benodigde banddruk was 150 kPa, zijnde de benodigde druk op de weg.

Hoewel sporadisch ook wel zelfrijdende hakselaars met een bunkeropbouw ingezet werden bij de oogst van maïs waren deze machines met zwadopraep voor gras toch vooral in gebruik bij groenvoerdrogerijen. Hierbij hoefde geen trekker met wagen mee te rijden over het veld, wat vooral onder nattere omstandigheden voordelen biedt. De bunker werd aan de rand van het veld gelost. Typerend voor het topsegment van de bunkerveldhakselaars in 1980 was een zelfrijdende veldhakselaar met een 11 ton bunker, met een maximale last op de achteras van 16000 kg en een benodigde banddruk van 280 kPa in het veld (Tabel 8).

In 2010 is de capaciteit van de in Nederland gebruikte veldhakselaars aanzienlijk groter dan in 1980, met maïsvoorzetstukken voor 6 tot 10 rijen, motorvermogens van 270 tot 480 kW en totaalgewichten met voorzetstuk van 11,5 tot 17,5 ton. De maïsvoorzetstukken zijn rijonafhankelijk geworden (er kan eventueel zelfs dwars op de rij mee geoogst worden), 2,5 keer breder en 3 keer zwaardere van in 1980. Als typerend voor het topsegment van Nederlandse maïshakselaars in 2010 is gekozen voor een veldhakselaar met een rij-onafhankelijk maïsvoorzetstuk met een werkbreedte van 7,5 meter, d.w.z. 10 rijen maïs (Tabel 8). Hoewel enkele fabrikanten 12 rijige (Figuur 8) maïsvoorzetstukken kunnen leveren worden deze in Nederland nauwelijks gebruikt. De vooraslast van een dergelijke machine is ca. 9540 kg en de typerende banddruk is 170 kPa. Dit is de druk die nodig is op de weg, omdat CTIS systemen niet in gebruik zijn op deze machines.

In 2010 waren slechts enkele zelfrijdende bunkerhakselaars in gebruik. De meeste van deze machines zijn niet in serieproductie gebouwd. Een aantal van deze bunkerhakselaars zijn uitgerust met een container op/afzetsysteem en zijn alleen ingezet bij het hakselen van luzerne en gras voor drogerijen. Andere 'eigenbouw' zelfrijdende bunkerhakselaars zijn vooral door sleutelaars gebouwd en worden ingezet in natte oogstjaren. Tijdens die natte oogstjaren is het transport met trekker en wagen de beperkende factor om de maïs van het veld af te krijgen; éénmalig berijden met de veldhakselaar met brede banden is dan te verkiezen boven herhaald berijden met de veldhakselaar en de trekker met wagen. Vanwege de grote variabiliteit tussen de machines en het beperkte aantal in gebruik zijnde machines, zijn de bunkerveldhakselaars niet meer als typerend voor 2010 beschouwd.



Figuur 8. Veldhakselaar met vierrijig maïsvoorzetstuk (boven-links) en een hakselaar met bunker (boven-rechts), typerend voor het topsegment machines in 1980, en een veldhakselaar met 10 rijig maïsvoorzetstuk, typerend voor het topsegment in 2010 (onder).

Tabel 8. Typerende wiellasten en banddrukken bij het hakselen van maïs en gras in 1980 en 2010.

Jaar	Typerend voor het topsegment machines	Typerende as	Maximale wiellast (kg)		Bandmaat	Band-breedte (cm)	Benodigde banddruk ¹ (kPa)	
			Veld	Weg			Veld	Weg
1980	Zelfrijdende maïshakselaar, 171 kW, 4 rijig voorzetstuk	Vooras	2500	2500	18.4x30 (12 PR)	47	ca. 100	150
1980	Zelfrijdende grashakselaar, 4 rijig, met 11 tons bunker	Achteras	8000	2800	28.1x26	71	280	ca. 150 (leeg)
2010	Zelfrijdende maïshakselaar 430 kW, 10 rijig voorzetstuk	Vooras	4770	4770	650/75R32	65	110	170

¹ 10 km/u en low traction (LT) in het veld; 30 km/u op de weg in 1980; 40 km/u op de weg in 2010.

3.8 Graanoogst

Graan wordt in Nederland uitsluitend geoogst met zelfrijdende maaidorsers (combines). In 2010 is de techniek ten opzichte van 1980 verbeterd en de capaciteit is enorm toegenomen (Van Hattum & Blomsma, 2008). Een opvallend verschil is dat in 2010 op de topmodellen steeds het axiaaldorsprincipe wordt toegepast. Het aantal assen en banden is gelijk gebleven.

In 1980 liep het motorvermogen uiteen van ca. 80 tot 160 kW, werden maaiborden gebruikt van 4 tot 6 meter breedte en varieerde de inhoud van de graantank van 2500 tot 6400 liter (1900 tot 4900 kg). Het totaalgewicht van combines met volle graantank varieerde van 8,3 tot 14,4 ton. Als typerend voor het topsegment machines in 1980 zijn in Tabel 9 de gegevens vermeld van een maaidorser met een motorvermogen van 129 kW, een 5,2 m breed maaibord en een graantank van 6300 liter (Figuur 9).

In 2010 liep het motorvermogen van maaidorsers die gebruikt worden in Nederland uiteen van ca. 260 tot 435 kW, waren maaiborden beschikbaar van 7,6 tot 10,7 m werkbreedte en varieerde de inhoud van de graantank van 9000 tot 14000 liter (Figuur 9). Het totaalgewicht van combines met volle graantank varieerde van 22,7 tot 30,3 ton. Als typerend voor het topsegment machines in Nederland in 2010 zijn in Tabel 9 de gegevens vermeld van een maaidorser met een motorvermogen van 380 kW, een 9,1 m breed maaibord en een graantank van 11500 liter. Doordat de opbouw van de machine nauwelijks gewijzigd is ten opzichte van 1980 is de bandbreedte beperkt door enerzijds de maximaal toegestane breedte van machines op de weg (3,50 m) en de breedte van de graanopvoer, die tussen de wielen door loopt. Standaard werden op de machines maximaal 90 cm brede banden gemonteerd. Ondank de plaatsing van bredere banden en radiaal i.p.v. diagonaalbanden is de benodigde banddruk toegenomen door de sterk gestegen wiellasten. Bij vrijwel alle merken en typen maaidorsers zijn wel bredere banden leverbaar, waarbij de grens van de maximaal toegestane machinebreedte opgezocht kan worden, waarmee lagere banddrukken mogelijk zijn.

De gewichtsverdeling over voor- en achteras van de maaidorser in 2010 is in de technische specificaties vaak niet gespecificeerd en moest daarom geschat worden. De technische maximum rijsnelheid is in 2010 nog steeds 30 km/uur. De benodigde banddruk is daarom ook weergegeven bij 30 km/uur.

De combine rijdt met lege graantank en met afgekoppeld maaibord over de weg. De benodigde drukken op de weg en in het veld zijn daarom van dezelfde orde van grootte, waarbij de hoogste van de twee in de praktijk toegepast zal worden.

Tabel 9. Typerende wiellasten en banddrukken bij het maaidorsen in 1980 en 2010.

Jaar	Typerend voor het topsegment machines	Typerende as	Maximale wiellast (kg)		Bandmaat	Band-breedte (cm)	Benodigde banddruk ¹ (kPa)	
			Veld	Weg			Veld	Weg
1980	Maaidorser met 129 kW motor, 5,2 m maaibord en 6300 l graantank	Vooras	5485	3226	23.1-30	58	160	140
2010	Maaidorser met 380 kW motor, 9,1 m maaibord en 11500 l graantank	Vooras	11771	6000	900/60R32	86	260	190

¹ 10 km/u, cyclic loading en low traction (LT) in het veld; 30 km/u op de weg in 1980 en 2010.



Figuur 9. Typerende maaidorser uit het topsegment machines voor 1980 met een 5,2 maaibord en 6300 liter graantank (links) en een maaidorser typerend voor 2010 (rechts), met 9,1 m maaibord en 11500 liter graantank.

3.9 Aardappeloogst

De aardappeloogst werd in 1980 uitgevoerd met 1 of 2 rijige getrokken bunkerrooiers, 2 rijige getrokken wagenrooiers of 2 rijige zelfrijdende wagenrooiers. De getrokken bunkerrooiers, met een bunkerinhoud van 3 - 4 ton (Figuur 10) werden voornamelijk gebruikt bij de oogst van fabrieksaardappelen in Noordoost Nederland en de pootgoedteelt in Noord Nederland. Door gebruik van een bunker hoefde niet meer midden op het perceel gelost te worden maar kon dit op de kopakker(s) gedaan worden. Bij de oogst van fabrieksaardappelen is 'standaard' een egelband voor verwijdering van loofresten achterop de rooier gemonteerd. In de pootgoedteelt werd de bunkerrooier ook uitgevoerd met een leestafel om moederknollen en tarra met de hand te kunnen verwijderen. Het leeggewicht van de getrokken bunkerrooier was 5 tot 7 ton. De hoogste aslast was typisch die op de trekkerachteras. Als typerend voor het topsegment van deze rooiers is gekozen voor een 2-rijige rooier met een bunkerinhoud van 4 ton en een oplegbelasting van de volle rooier van 3170 kg (Figuur 10, linksboven). De maximale last op de trekkerachteras was dan 6940 kg bij volle bunker en 4100 kg bij lege bunker (Tabel 10). De typerende banddruk was 190 kPa, de druk die bij 10 km/u nodig is in het veld.

Voor de oogst van consumptieaardappelen werden in 1980 in het algemeen wagenrooiers gebruikt. Op middelgrote bedrijven werden getrokken rooiers gebruikt en op grotere bedrijven en door loonwerkers zowel getrokken als zelfrijdende rooimachines. Bij de getrokken wagenrooiers had de achteras van de trekker meestal de hoogste aslast (2 - 4 ton), maar de benodigde banddruk in de trekkerbanden was daarbij laag. De aslast van de rooier was meestal wat lager (maximaal 3,8 ton). Doordat op de as van de rooier relatief smalle banden toegepast werden waren de benodigde banddrukken vaak hoog, maar door de beperkte aslast was het risico op verdichting van de ondergrond beperkt. Het topsegment van de wagenrooiers waren de zelfrijdende machines. Veel zelfrijders waren gebaseerd op een getrokken wagenrooier, waarbij op of aan het frame van de getrokken rooier de motor en het aandrijfdeel van een trekker gemonteerd werden (Figuur 10, rechtsboven). Twee merken konden een specifiek als zelfrijdende wagenrooier ontworpen machine leveren. De zelfrijdende wagenrooiers waren 2 wiel aangedreven. Als typerend voor het topsegment zelfrijdende wagenrooiers werd een machine gekozen die gebaseerd was op een getrokken rooier en het aandrijfdeel van een trekker (Tabel 10).

Anno 2010 wordt de oogst van poot- en fabrieksaardappelen nog steeds overwegend uitgevoerd met 2-rijige getrokken bunkerrooiers die zijn voorzien van een leestafel en/of egelband. De verschillen met de rooiers uit 1980 zijn dat ze nu in verstek achter de trekker werken, meer reinigingscapaciteit op de machine hebben en beschikken over een twee keer zo grote bunker. Typerend voor het topsegment van deze rooiers is een 2-rijige verstekrooier (Figuur 10, linksonder) met een bunker van 8 ton. De as van de rooier heeft bij volle bunker de hoogste aslast (Tabel 10). Standaard zitten er relatief stijve 600/60-30.5 banden op de as, die de last in het veld bij 170 kPa

banddruk kunnen dragen, wat ook ruim voldoende is voor het transport van de lege rooier over de weg. Bij de optionele, bredere 800/45-30.5 banden kan de banddruk verlaagd worden naar 130 kPa.

Tabel 10. *Typerende wiellasten en banddrukken bij het aardappels rooien in 1980 en 2010.*

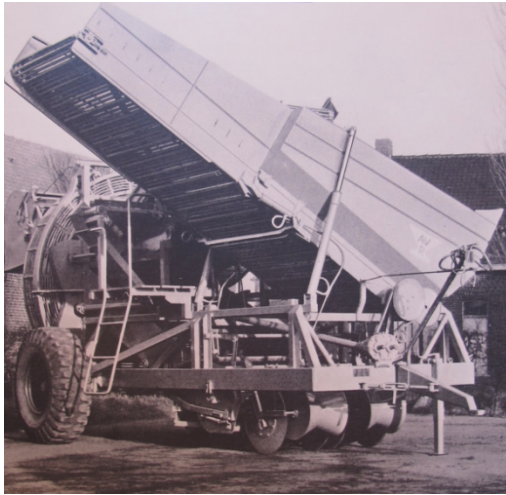
Jaar	Typerend voor het topsegment machines	Typerende as	Maximale wiellast (kg)		Bandmaat	Bandbreedte (cm)	Benodigde banddruk ¹ (kPa)	
			Veld	Weg			Veld	Weg
1980	Poot- en fabrieksaardappel: getrokken bunkerrooier, 2-rijig, 4 ton bunker	Trekker achteras	3470	2040	16.9-38	43	190	110
1980	Consumptieaardappel: zelfrijdende wagenrooier, 2-rijig	Achteras rooimachine	1850	1850	13x24	33	150	210
2010	Poot- en fabrieksaardappel: getrokken bunkerrooier, 2-rijig, verstek, 8 ton bunker	As rooi-machine	6170	4170	600/60-30.5 ²	60	170	140
2010	Zelfrijdende bunkerrooier 4 rijig, 15 ton bunker, met rupsen	Vooras Achteras	16500 5000	9000 5000	890x2950 ³ 620/75R26	89 59	100 170	- 260

¹ 1980 en 2010: 10 km/u in het veld, geen cyclic loading; 30 km/u op de weg.

² Extra stijve band (load index 171).

³ Rubber rupsband 890 mm breed, 2950 mm lang, contactvlak 890x1830 mm.

Voor de oogst van consumptieaardappelen worden in 2010 overwegend getrokken 4-rijige wagenrooiers en zelfrijdende 4-rijige bunkerrooiers gebruikt. De zelfrijdende bunkerrooiers kunnen tijdens het rooien lossen of lossen in een op de kopakker gereedstaande wagen. De 4 rijige zelfrijdende bunkerrooiers vormen het topsegment van de rooiers voor consumptieaardappelen. Als typerend voorbeeld voor het topsegment zijn in Tabel 10 de loopwerkkenmerken weergegeven van de grootste zelfrijdende 4-rijige bunkerrooier met een bunkerinhoud van 15 ton (Figuur 10, rechtsonder). Omdat alleen het totaalgewicht van de machine bekend was, is de verdeling van het gewicht over de wielen geschat. Op deze rooiers worden rubber rupswielen toegepast om de hoge vooraslast van ca. 33.000 kg te kunnen dragen. Door het gebruik van rubber rupsen is de gemiddelde bodemdruk zelfs bij deze hoge aslast niet hoger dan 100 kPa. De (stuur)wielen op de achteras zijn dicht tegen elkaar aan gemonteerd en lopen op de onbereden strook tussen de rupsen van de vooras. Daardoor wordt de grond over bijna de hele machinebreedte 1 keer bereden. De stuurwielen hebben naar schatting een wiellast van 5000 kg. Bij de gemonteerde banden moet de banddruk op de weg dan ca. 260 kPa zijn. Omdat op deze machine geen CTIS wordt toegepast is deze banddruk ook in het veld van toepassing.



Figuur 10. Typerende aardappelrooiers voor 1980 (boven); tweerijige bunkerrooier met een bunkerinhoud van 4 ton (links) en een tweerijige wagenrooier (rechts). Typerende aardappelrooiers voor 2010 (onder): tweerijige bunkerrooier met een bunkerinhoud van 8 ton (links) en een vierrijige zelfrijdende bunkerrooier met een bunkerinhoud van 15 ton.

3.10 Suikerbietenogst

Hieronder wordt de bodembelasting door de oogstmachines voor suikerbieten besproken. Op de bodembelasting door kipwagens werd ingegaan in paragraaf 3.4.

In 1980 werden suikerbieten geogst in een 2-fase of een 1-fase systeem. Bij de 2-fase oogst werden de bieten in de eerste werkgang ontdaan van loof, gekopt en gerooid. Hiertoe werd voorop een trekker of werktuigendrager een ontbladeraar gebouwd en in de werktuigendrager of achterop de trekker een rooimachine, die de bieten in een zwad achterliet. In de tweede werkgang werden de bieten op een wagen geladen met een door een trekker getrokken lader, al of niet voorzien van een kleine tussenbunker, waardoor de lader door kan blijven rijden bij het wisselen van wagens. Sporadisch werden ook wel zelfrijdende of getrokken laders gebruikt om de bieten in een grotere bunker te verzamelen. Typierend voor het topsegment machines voor de 2-fase oogst waren een 6-rijige ontbladeraar en rooier aangebouwd aan een 90 kW trekker en een lader met kleine tussenbunker, aangebouwd aan een 50 kW trekker (Figuur 11, linksboven). De hoogste aslasten bij de 2-fase oogst waren ongeveer 4800 kg en kwamen voor bij de achteras van de trekker met ontbladeraar en rooier. Omdat de trekker tussen de nog niet gerooiden bieten reed konden alleen smalle banden gebruikt worden. Daarom werd vaak dubbele montering op rijafstand gebruikt, waardoor de benodigde banddruk beperkt bleef tot ca. 220 kPa (Tabel 11).

Bij de 1-fase oogst wordt het ontbladeren, kopen, rooien, reinigen en verzamelen in een bunker door één machine gedaan, de zogenoemde zelfrijdende bunkerrooiers (Figuur 11). Bij deze rooiers is de ontbladeraar en het rooi-

gedeelte als een eenheid voor de voorwielen in een driepuntshefinrichting opgehangen. Na het rooien worden de bieten met behulp van zeefraders en (elevator)kettingen gereinigd en naar de bunker getransporteerd. Omdat het ontbladeren en rooien vóór de voorwielen wordt gedaan wordt niet tussen de bieten gereden en kunnen brede banden worden gemonteerd. Typerend voor het topsegment machines voor de 1-fase oogst in 1980 waren 6-rijige zelfrijdende bunkerrooiers met een bunkercapaciteit van 10 tot 13 ton bieten (Figuur 11, rechtsboven). Als voorbeeld daarvan zijn in Tabel 11 de kenmerken uitgewerkt voor een bunkerrooier met een bunkercapaciteit van 10 ton.

Tabel 11. Typerende wiellasten en banddrukken bij de suikerbieten oogst in 1980 en 2010.

Jaar	Typerend voor het topsegment machines	Typerende as	Maximale wiellast (kg)		Bandmaat	Bandbreedte (cm)	Benodigde banddruk ¹ (kPa)	
			Veld	Weg			Veld	Weg
1980	2 fase oogst: 6-rijige ontbladeraar + 90 kW trekker + zwadrooier	Achteras trekker	1200	1200	9.5-48 (dual)	24	160	220
1980	6-rijige zelfrijdende bunkerrooier met 10 ton bunker	Beide assen	6500	4000	23.1/18-26 (18 PR)	59	170 ²	150
2010	6 rijige zelfrijdende bunkerrooier met 28 ton bunker (3 assen)	Achteras	11900	5400	1050/50R32	105	240 ³	100
2010	6-rijige zelfrijdende bunkerrooier met rupsen en 22 ton bunker (2 assen)	Vooras	16000	9700	770x2950 ⁴	77	100 ⁵	60 ⁵
		Achteras	9700	5000	900/60R32	86	200	100

¹ 10 km/u in het veld; 30 km/u op de weg.

² Onvoldoende gegevens van deze band. Gegevens zijn van vergelijkbare, zeer stijve Trelleborg 23.1-26 grondverzetband (158A8); bodemdruk >> banddruk.

³ Met cyclic loading.

⁴ Rubber rupsband 770 mm breed, 2950 mm lang, contactvlak 770x1830 mm.

⁵ Bodemdruk.

In 2010 werd de bietenoogst vrijwel uitsluitend uitgevoerd met zelfrijdende 6-rijige bunkerrooimachines (IRS, 2010), maar deze zijn uitgerust met veel grotere bunkers en meer reiniging op de machines dan in 1980. Negen- en twaalfrijige machines zijn al even op de markt, maar in Nederland lopen er daar slechts enkele van. De bunkers van de huidige rooimachines worden in een naastrijdende of in een op de kopakker gereedstaande wagen gelost. De inhoud van de transportwagen is vaak afgestemd op de inhoud van de bunker van de rooier zodat met 1 bunkerinhoud de wagen vol is. De conventionele bunkerrooiers hadden twee assen waarbij de hoogste last op de vooras rustte. De toename van de bunkercapaciteit tot een bunkerinhoud van maximaal 22 ton werd opgevangen worden door montage van bredere banden en verdeling van het gewicht over de beide assen. Omdat de inhoud van de bunkers in de loop van de jaren is toegenomen tot boven de 22 ton en er een beperking is aan de grootte en draagkracht van de banden, zijn rooiers ontwikkeld met 3 assen of met rubber rups onderstellen. Deze vormden in 2010 het topsegment van de suikerbietenrooiers met 22 tot 28 ton bunkers.

Bij de 3 assige rooiers van Agrifac en Vervaet is de middelste as direct achter de voorste as geplaatst (Figuur 11, linksonder). De wielen van de achteras lopen grotendeels over de grond die niet bereiden werd door de voorassen, zodat het veld bijna volvelds wordt bereiden. Als typerend voorbeeld voor de bodembelasting door 3-assige rooiers zijn de loopwerk karakteristieken van een rooier met een bunker met een laadvermogen van 22 ton weergegeven in Tabel 11.

Indien rubber rupsen worden toegepast worden deze op de vooras van een 2-assige rooier gemonteerd en wordt de gewichtsverdeling over de assen aangepast. Om optimaal voordeel te behalen van de rupsen werden machines zelfs ook opnieuw ontworpen, waarbij de reiniging compacter gebouwd is en de bietenstroom over de rupsen heen geleid wordt. Een dergelijke machine werd gekozen als typerend voor een bietenrooier met rupswielen in 2010 (Figuur 11, rechtsonder). Kenmerken van het loopwerk zijn weergegeven in Tabel 11.



Figuur 11. Typerende bietenrooimachines: een zesrijige bietenrooier voor en achter aangebouwd aan een trekker (linksboven) en een 6 rijige zelfrijdende bunkerrooier met een bunkerinhoud van 10 ton (rechtsboven) voor 1980. Voor 2010 een 6 rijige zelfrijdende bietenrooier met 3 assen en 28 ton bunkerinhoud (linksonder) en een 6 rijige zelfrijdende bunkerrooier op rubber rupsen met een bunkerinhoud van 22 ton (rechtsonder).

4. Grondspanningen in 1980 en 2010

Met behulp van de typerende aslasten en bodemdrukken van topsegment machines in 1980 en 2010 werd berekend welke piek-grondspanningen op diepten van 25, 40 en 50 cm in de ondergrond zullen voorkomen. Deze zijn samengevat in de Tabel 12, waarbij de typerende machines in dezelfde volgorde als in de tabellen 3 t/m 11 zijn weergegeven met een korte samenvatting van wiellasten, bandbreedtes en benodigde banddrukken.

Tabel 12. *Typerende wiellasten, banddrukken en piekspanningen in de ondergrond op 3 diepten van 25; 40 en 50 cm voor een aantal typerende landbouwmachines in 1980 en 2010.*

Jaar	Typerende machine	Wiellast in het veld (kg)	Band- breedte (cm)	Banddruk in het veld		Grondspanning op diepte (cm) van:		
				minimaal (kPa)	typerend ¹ (kPa)	25 (kPa)	40 (kPa)	50 (kPa)
<i>Trekkerachteras bij ploegen</i>								
1980	100 kW trekker met vierschaar wentelploeg.	4350	43	270	270	542	311	209
	Klei: trekkracht 28 kN	2175	43	100	160	340	178	115
	Zand: trekkracht 14 kN							
2010	150 kW trekker met zesschaar wentelploeg.	6530	54	270	270	565	343	251
	Klei: trekkracht 42 kN	3215	54	100	160	336	200	139
	Zand: trekkracht 21 kN							
2010	idem, zesschaar wentelploeg, bovenover							
	Klei: trekkracht 45 kN	4550	72	100	100	159	104	83
	Zand: trekkracht 23 kN	2275	72	60	100	98	62	49
<i>Gewasbescherming</i>								
1980	Veldspuit, vast opgebouwd op trekkerchassis, boombreedte 24 m en tankinhoud 2000 l.	1875	31	190	265	159	121	55
2010	Getrokken veldspuit, boombreedte 36 m en tankinhoud 5000 l.	3630	53	70	130	164	104	80
2010	Zelfrijdende veldspuit, boombreedte 48 m en tankinhoud 5000 l.	4100	53	90	160	188	118	89
<i>Transport met landbouwwagens</i>								
1980	16 tons wagen, tandemas, 80 kW trekker	4600	51	(150)	250	250	144	106
2010	25 tons wagen, drie-assig, 150 kW trekker	5000	64	130	190	219	136	103
2010	30 tons wagen, drie-assig, 150 kW trekker	6250	64	170	190	243	159	123
<i>Transport van voedergrassen</i>								
1980	Opraapsnijwagen, tandemas, 7,8 ton laadvermogen, 40 kW trekker.	2410	34	310	310	186	94	66
2010	Dubbeldoelwagen, tridemas, 21 ton laadvermogen, 140 kW trekker	4500	71	120	180	185	116	90

¹ *Cursief = de minimaal benodigde banddruk op de weg was typerend en is gebruikt in SOCOMO.*

Jaar	Typerende machine	Wielast in het veld (kg)	Band- breedte (cm)	Banddruk in het veld		Grondspanning op diepte (cm) van:		
				minimaal (kPa)	typerend ¹ (kPa)	25 (kPa)	40 (kPa)	50 (kPa)
<i>Mesttoediening</i>								
1980	Mesttank, 12 m ³ , tandemas, met ketsplaat	3500	41	230	320	228	123	88
2010	Mesttank, 26 m ³ , tridemas met zodenbemester of bouwlandinjecteur	5600	63	140	190	229	147	113
2010	Zelfrijder, 19 m ³ , 2 assen met bemester, hondegang, met lege tank over de weg	8200	105	120	120	182	137	114
	Idem met volle tank over de weg	8200	105	120	240	243	159	126
2010	Trekker, aanvoersleep-slang, zodenbemester, breedte: 12 m	5400	90	80	140	165	112	90
<i>Hakselen van maïs en gras</i>								
1980	Zelfrijdende maïshakselaar, 171 kW, 4 rijig voorzetstuk	2500	47	100	150	148	85	63
1980	Zelfrijdende grashakselaar, 4 rijig, met 11 tons bunker	8000	71	280	280	259	195	150
2010	Zelfrijdende maïshakselaar 10 rijig voorzetstuk zonder bunker	4770	65	110	170	196	125	96
<i>Maaidorsen</i>								
1980	Maaidorser met 129 kW motor, 5,2 m maaibord en 6300 l graantank.	5485	58	160	160	218	143	110
2010	Maaidorser met 380 kW motor, 9,1 m maaibord en 11500 l tank	11771	86	260	260	335	235	187
<i>Aardappels rooien</i>								
1980	Poot- en fabrieksaardappel: getrokken bunkerrooier, 2-rijig, 4 ton bunker	3470	43	190	190	203	116	84
1980	Consumptieaardappel: Zelfrijdende wagenrooier, 2-rijig	1850	33	150	210	146	74	53
2010	Poot- en fabrieksaardappel: getrokken bunkerrooier, 2-rijig, verstek, 8 ton bunker	6170	60	170	170	232	155	120
2010	Zelfrijdende bunkerrooier 4 rijig, 15 ton bunker, met rupsen. Achteras met banden	5000	59	170	260	242	144	108
	Vooras met rupsen (890 x 2950 mm)	16500	89	n.v.t.	n.v.t.	116	91	83
<i>Suikerbietenoogst</i>								
1980	2 fase oogst: 6-rijige ontbladeraar + 90 kW trekker + zwadrooier	1200	24	160	220	113	53	38
1980	6-rijige zelfrijdende bunkerrooier met 10 ton bunker	6500	59	170	170	237	161	125
2010	6 rijige zelfrijdende bunkerrooier met 28 ton bunker (3 assen)	11900	105	240	240	304	213	172
2010	6-rijige zelfrijdende bunkerrooier met rupsen en 22 ton bunker (2 assen) Achteras met banden	9700	86	200	200	276	194	155
	Vooras met rupsen (770 x 2950 mm)	16000	77	n.v.t.	n.v.t.	133	101	89

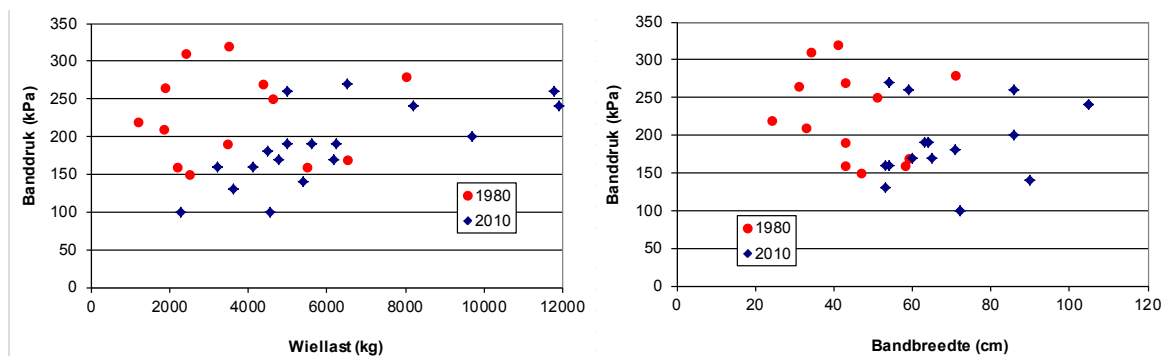
¹ *Cursief = de minimaal benodigde banddruk op de weg was typerend en is gebruikt in SOCOMO.*

5. Vergelijking van de bodembelasting in 1980 en 2010

In dit hoofdstuk wordt de ontwikkeling van de bodembelasting besproken op basis van de inventarisatie van wiellasten, bandbreedtes en banddrukken van landbouwmachines, typerend voor het topsegment in 1980 en 2010, evenals van de berekende grondspanningen zoals samengevat in tabel 12.

Wiellast, bandbreedte en banddruk

In Figuur 12 zijn de wiellasten, banddrukken en bandbreedtes van typerende machines voor 1980 en 2010 weergegeven. De rechter figuur laat zien dat de wiellasten in 2010 aanzienlijk hoger waren dan in 1980. In de figuur links is te zien dat de banden in 1980 gemiddeld smaller waren en een hogere banddruk hadden dan in 2010. De figuur rechts toont dat dit laatste beeld genuanceerd moet worden. In 1980 waren de banddrukken alleen duidelijk hoger dan in 2010 bij wiellasten kleiner dan ca. 5 ton. De toepassing van bredere banden (met ook een grotere diameter) heeft daar geleid tot gemiddeld lagere banddrukken, ondanks een gemiddelde verhoging van de wiellasten. Bij wiellasten groter dan ca. 5 ton zijn weliswaar zeer brede banden toegepast, maar deze waren noodzakelijk om de grotere wiellasten te kunnen dragen, waarbij dan ook de banddruk uit noodzaak verhoogd moest worden omdat er geen bredere banden beschikbaar zijn. De typerende banddrukken bij wiellasten > 7 ton zijn steeds relatief hoog, > 200 kPa. In tegenstelling tot in 1980 neemt in 2010 de banddruk trendmatig toe met de wiellast.



Figuur 12. Voorkomende wiellasten, banddrukken en bandbreedten in 1980 en 2010.

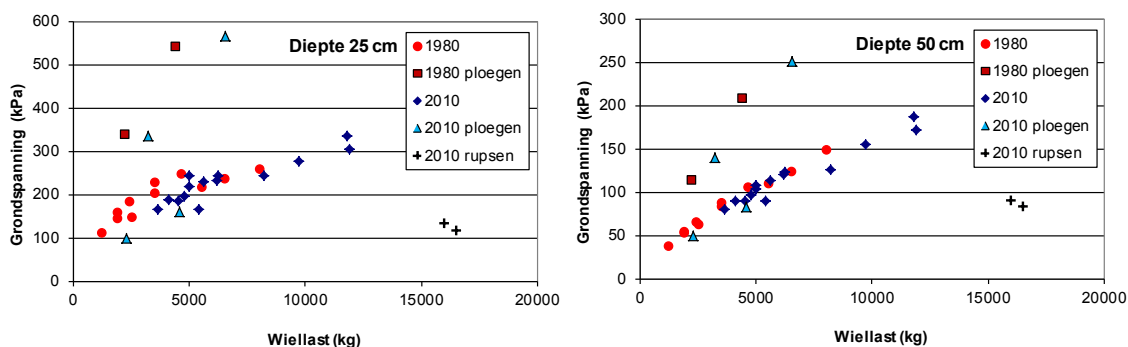
Paarsgewijze vergelijking van de data van gelijksoortige machines met hetzelfde doel (Tabel 12) laat zien dat de typerende wiellast in alle gevallen hoger is geworden. De grootste toenames van wiellasten zien we bij machines die leeg over de weg gaan en in het veld pas beladen worden. In dit geval heeft de regelgeving voor voertuigen op de openbare weg geen of een beperkte rem gezet op de ontwikkeling naar hogere aslasten. In andere gevallen zijn de maximale wiellasten ongeveer gelijk gebleven aan wat maximaal is toegestaan op de weg.

Paarsgewijs vergeleken waren de benodigde banddrukken bij gelijksoortige machines voor ploegen, gewasbescherming, transport, mesttoediening en het hakselen van maïs en gras in 2010 steeds ongeveer gelijk of lager dan in 1980. De typerende aslast bij deze machines was meestal < 7 ton. Hetzelfde geldt voor de getrokken bunkerrooiers voor poot- en fabriksaardappelen die relatief kleine bunkers hebben. Bij ploegen heeft de ontwikkeling richting bovenoverploegen een gunstig effect gehad op de bandbreedte die toegepast kan worden en daarmee op de banddruk. Bij de mesttoediening heeft de introductie van het systeem met aanvoersleepslang een gunstig effect gehad op de wiellast en banddruk. Evenzo had bij het hakselen van gras de uitfasering van hakselaars met bunker een gunstig effect op de wiellast en de banddruk.

Bij de graanoogst, de oogst van consumptieaardappelen en de oogst van suikerbieten zijn de wiellasten in 2010 aanzienlijk hoger geworden dan in 1980. Bij de maaidorser heeft dit geleid tot een aanzienlijke verhoging van de benodigde banddruk. Hoewel niet als typerend voor 2010 beschouwd, worden ook bij maaidorsers nu rupsen toegepast, waarbij de gemiddelde bodemdruk aanzienlijk wordt verlaagd. Bij de aardappeloogst heeft de ontwikkeling van het rooien met zelfrijdende bunkerrooiers geleid tot zeer hoge wiellasten en het inzetten van rupsen bij de topsegment machines. Echter, door veronachtzaming van de lastafsteuning op de tweede as van de machine is deze nu uitgerust met relatief smalle banden, waarbij een hoge banddruk nodig is. Ook bij de suikerbietenoogst zijn de wiellasten toegenomen door capaciteitsvergroting en daarnaast ook door het verdwijnen van de twee-fase oogst. Bij de topsegment bunkerrooiers die met banden zijn uitgerust is de benodigde banddruk toegenomen van 170 kPa in 1980 tot ca. 240 kPa in 2010. Ook bij suikerbietenrooiers worden rupsen toegepast, die de bodemdruk bij de zwaarst belaste as aanzienlijk verlagen. Aandacht is eveneens nodig voor de tweede as (met banden), waarbij de benodigde banddruk hoog is. Samengevat zien we voor de oogst van graan, consumptieaardappelen en suikerbieten in 2010 een combinatie van hoge wiellasten en hoge banddrukken (meer dan 200 kPa) bij conventionele machines en innovatie via het gebruik van rubber rupswielen, waardoor de gemiddelde bodemdruk aanzienlijk verlaagd kan worden.

Spanningen in de grond

In Figuur 13 zijn de berekende grondspanningen op 25 cm en 50 cm diepte beneden maaiveld uitgezet tegen de wiellasten van de typerende machines voor 1980 en 2010. Afgezien van de duidelijk afwijkende grondspanningen bij het ploegen en bij de toepassing van rubber rupsen op oogstmachines is de algemene trend dat hoe hoger de wiellast des te hoger de spanningen in de ondergrond. De toename van de wiellasten van 1980 tot 2010 betekent daarom ook een toename van de spanningen in de ondergrond. Gemiddeld over alle als typerend beschouwde machines, dus inclusief ploegen en oogstmachines met rupsbanden bleef de grondspanning op 25 cm diepte ongeveer gelijk en nam op 50 cm diepte toe met 20% toe (Tabel 13).



Figuur 13. Effect van wiellast op de grondspanningen op een diepte van 25 en 50 cm in 1980 en 2010. De twee wiellasten boven de 15000 kg zijn van rubber rupswielen.

Tabel 13. Bodembelastingskenmerken in 1980 en 2010; gemiddelden en maxima van de waarden voor de als typerend voor 1980 en 2010 beschouwde machines.

Jaar		Wiellast (kg)	Bandbreedte (cm)	Banddruk (kPa)	Grondspanning (kPa)		
					d=25 cm	d=40 cm	d=50 cm
1980	Gemiddeld	3686	44	227	233	138	97
	Maximum	8000	71	320	542	311	209
2010	Gemiddeld	7108	74	173	229	150	117
	Maximum	16500	105	270	565	343	251

In principe is het mogelijk om hoge spanningen in de ondergrond te vermijden door de bodemdruk onder de banden laag te houden. Om de grondspanning gelijk te houden geldt hierbij: hoe hoger de wiellast hoe lager de bodemdruk en dus ook de banddruk moet zijn. Uit Figuur 12 (links) blijkt echter dat de trend juist omgekeerd is: in 2010 neemt de banddruk trendmatig toe met de wiellast. Zoals verwacht nemen de spanningen in de ondergrond dan toe met toenemende wiellast. Dat een lage gemiddelde bodemdruk in het contactvlak effectief kan zijn om hoge spanningen in de ondergrond te vermijden blijkt uit de grondspanningen onder de zwaar belaste rupsen (16 en 16,5 ton), die juist veel lager te zijn dan volgt uit de algemene trend onder banden (Figuur 13). Dit is voor de spanningen in de ondergrond een gunstige ontwikkeling. Wel is het zo dat de grondspanning onder een rups met de diepte minder snel afneemt dan onder een band. Zo neemt onder de rupsen de grondspanning van 100% op 25 cm diepte af tot ca. 70% op 50 cm diepte, terwijl onder banden, afhankelijk van de wiellast, de grondspanning afneemt tot 35% à 55% op 50 cm diepte. Een eventuele toename van de bodemdruk onder rupsen zou daarom direct leiden tot hogere spanningen in de ondergrond. Op dit moment wordt de gemiddelde bodemdruk onder rupsen echter constructietechnisch beperkt tot ca. 100 kPa.

De relatief hoge grondspanningen op zowel 25 als 50 cm diepte bij het ploegen (Figuur 13) worden veroorzaakt door de combinatie van hoge gevraagde trekkracht, de hoge wiellast die nodig is om de hoge trekkracht te bereiken en het feit dat met het tractorwiel in de open voor, direct op de ondergrond wordt gereden. Vooral bij het ploegen van kleigrond treden dan zeer hoge grondspanningen op. Ondanks dat de benodigde trekkracht en wiellast bij zandgronden lager zijn dan bij klei, zijn ook daar de grondspanningen duidelijk groter dan de algemene trend. Door bovenoverploegen worden de spanningen in de ondergrond teruggebracht tot de normale waarden, vallend binnen de algemene trend van grondspanning versus wiellast.

Ook bij paarsgewijze vergelijking van gelijksoortige machines zijn in 2010 de piekspanningen in de ondergrond soms gelijk, maar meestal hoger dan in 1980. Hieronder worden de spanningen in de ondergrond op 50 cm diepte besproken, waarbij bedacht moet worden dat de spanningen op 25 en 40 cm diepte altijd hoger zullen zijn.

Bij de gewasbescherming, het transport van voedergewassen en het hakselen van maïs en gras zijn in 2010 de spanningen in de ondergrond op 50 cm diepte bij vergelijkbare machines hoger dan in 1980. De waarden blijven in 2010 echter beperkt tot maximaal ca. 100 kPa en de machines behoren daarmee binnen deze studie tot de groep met de laagste spanningen in de ondergrond. Het uitfaseren van het "bunkerhakselen" bij gras heeft voor de spanningen in de ondergrond bij de voederwinning een positief effect gehad.

Middelhoge spanningen op 50 cm diepte (100 – 150 kPa) komen in 2010 voor bij ploegen op zand, bij de mesttoediening en bij het aardappels rooien. Ook bij deze groep zijn de spanningen toegenomen ten opzichte van 1980, maar bij elke machine groep zijn ook in de praktijk al toegepaste methoden waarmee de spanningen teruggebracht kunnen worden tot waarden kleiner dan 100 kPa. Voor ploegen is dit het bovenoverploegen, voor de mesttoediening het systeem met aanvoersleepslang en bij het aardappels rooien de toepassing van rubber rupsen onder de zwaarst belaste as.

De hoogste spanningen, > 150 kPa, op 50 cm diepte komen in 2010 voor bij het ploegen op klei, bij het maaidorsen en bij de suikerbieten oogst. De grondspanningen bij het topsegment van de ploegen op kleigrond waren in 1980 al 209 kPa, dit is zelfs hoger dan die van enige andere topsegment machine in 2010. In 2010 is de grondspanning bij het ploegen op kleigrond toegenomen tot 251 kPa. Door de toepassing van bovenoverploegen zijn in de praktijk op een deel van de kleigronden de grondspanningen afgenomen tot ca. 80 kPa op 50 cm diepte.

Bij het topsegment maaidorsers is de grondspanning op 50 cm diepte toegenomen van 110 kPa in 1980 tot 187 kPa in 2010. Hoewel de maaidorser met rubber rupswielen in 2010 niet werd beschouwd als typerend voor het topsegment machines lopen er op dit moment wel een aantal maaidorsers met rupsen in Nederland. Door toepassing van rubber rupsen is waarschijnlijk ook bij maaidorsers de bodemdruk en de grondspanning aanzienlijk te verlagen.

Bij de suikerbietenrooiers waren de grondspanningen in 1980 laag bij de zwadrooier, 38 kPa op 50 cm diepte. Bij de tweefasen oogst waren de grondspanningen onder de landbouwwagens, ca. 106 kPa echter bepalend voor de

optredende grondspanningen. De topsegment bunkerrooiers hadden in 1980 grondspanningen van 125 kPa op 50 cm diepte. In 2010 liepen de grondspanningen van bunkerrooiers op banden op tot 172 kPa. Op een deel van het areaal werden in 2010 bunkerrooiers met rubber rupsen toegepast waardoor de grondspanningen onder de zwaarst belaste as terugliepen tot 89 kPa op 50 cm diepte, maar onder de tweede as, met banden, was de grondspanning nog hoog, 155 kPa op 50 cm diepte.

6. Discussie en conclusies

Om de ontwikkeling van de bodembelasting van 1980 tot 2010 te karakteriseren is ervoor gekozen om de bodembelasting van het topsegment van de landbouwmachines uit die jaren te beschouwen. Met topsegment machines wordt bedoeld machines die typisch door grotere bedrijven en loonwerkers gebruikt werden. Omdat het risico op ondergrondverdichting bepaald wordt door de hoogste bodembelastingen die in de loop van de tijd plaatsvinden en omdat loonwerkmachines vaak de zwaarste machines zijn die op het land komen, werd de bodembelasting van deze topsegment machines representatief geacht voor de werkelijk voorkomende bodembelasting in de praktijk. Voor oogstwerkzaamheden is deze aanname correct; oogstwerkzaamheden werden in 1980 al veel door de loonwerker uitgevoerd en in 2010 vrijwel uitsluitend.

Omdat ploegen vaak door de bedrijven zelf uitgevoerd wordt, zullen de topsegment ploegen niet representatief zijn voor de 'gemiddeld' gebruikte ploeg. De gemiddeld gebruikte ploeg is in 2010 waarschijnlijk de 4-schaar wentelploeg die in 1980 als topsegment machine werd beschouwd. Bij toepassing van deze ploeg zijn de piekspanningen in de ondergrond evenals bij een 6-schaar ploeg relatief hoog, vergeleken met andere machines in 2010. De keuze van een 6-schaar topsegment ploeg voor 2010 leidt daarom waarschijnlijk maar tot een lichte overschatting van de werkelijk voorkomende gemiddelde piekspanningen in de ondergrond in 2010.

De hier berekende typerende banddrukken en grondspanningen hebben betrekking op de standaard op de machine geleverde banden. Bij montage van bredere banden is het vaak mogelijk om de banddruk en daarmee ook de grondspanningen te verlagen. Bij gebrek aan informatie is er van uitgegaan dat de machines meestal met standaardbanden verkocht werden en dat de bodembelasting daarbij als representatief voor de praktijk beschouwd mag worden.

In dit rapport is als uitgangspunt genomen dat centrale banddrukregelsystemen (CTIS) niet in de praktijk toegepast worden. In het algemeen genomen kan dit als een correct uitgangspunt beschouwd worden. In een beperkt aantal gevallen is dit uitgangspunt echter niet juist. Bekend is bijvoorbeeld dat bij de mesttoediening met aanvoersleepslingensystemen in het voorjaar heel sterk gelet wordt op de banddruk. Deze wordt daar stelselmatig aangepast om in het veld met een zo laag mogelijke spanning te kunnen rijden. Uit de gegevens voor 2010 blijkt dat in nog een aantal gevallen het gebruik van CTIS zou kunnen leiden tot een lagere typerende banddruk. Het gaat daarbij vrijwel steeds om situaties met gelijke maximale wiellasten op het veld en op de weg, om wiellasten kleiner dan 6 ton en om grondspanningen op 50 cm diepte van 125 kPa (1,25 bar) of lager. CTIS kan dan aanzienlijk helpen om de grondspanningen bovenin het bodemprofiel te reduceren. In het gebied van mogelijke toepassing zal de reductie van de grondspanning op 50 cm diepte door CTIS beperkt zijn. Bij wiellasten groter dan 6 ton in het veld gaat het voornamelijk om machines die alleen in het veld beladen worden. Bij deze toepassingen, waarbij relatief hoge grondspanningen voorkomen, biedt het gebruik van CTIS geen mogelijkheden om de banddruk te verlagen.

De mogelijkheden van ultraflex banden, waarmee nu ook met lage banddruk op de openbare weg gereden mag worden met snelheden tot 65 km/uur zijn niet uitgebreid geanalyseerd in deze studie. Een beperkte analyse laat zien dat de maximale wiellasten bij dit type banden voornamelijk beperkt zijn tot 5,7 ton bij 100 kPa (1 bar) banddruk. Daarmee zijn deze banden wellicht uitstekend in te zetten om de belasting van de ondergrond laag te houden bij wiellasten < ca. 6 ton, maar bieden ze waarschijnlijk beperkte mogelijkheden voor machines met zeer hoge wiellasten.

Conclusies

De maximale wiellast van de beschouwde machines bleek gemiddeld toegenomen van ca. 3700 kg in 1980 naar ca. 7100 kg in 2010, ongeveer een verdubbeling. De hoogst voorkomende wiellast in 1980 was 8000 kg bij een zelfrijdende grashakselaar en in 2010 was dit 16500 kg (op een rupswiel) bij een zelfrijdende bunkerrooier voor aardappelen. In 2010 werden gemiddeld grotere banden gemonteerd (70% breder) dan in 1980. De bandbreedte was in 1980 gemiddeld 44 cm (maximaal 71 cm) en in 2010 74 cm (maximaal 105 cm). De grotere banden werden

toegepast om de toegenomen wiellasten te kunnen dragen, maar ook om de benodigde banddruk en daarmee de gemiddelde bodemdruk onder de band te verlagen. De minimaal benodigde banddruk nam 20% af van 227 kPa (2,3 bar) in 1980 tot 173 kPa (1,7 bar) in 2010. Bij vergelijkbare machines nam de banddruk echter alleen af als de wiellast in 2010 niet hoger was dan ca. 7000 kg; bij wiellasten hoger dan 7000 kg nam de banddruk juist toe omdat er in die situatie geen mogelijkheden waren om de toename van de wiellast voldoende te compenseren door grotere banden te kiezen. Bij twee van de gekozen topsegmentmachines met zeer hoge wiellasten werden in 2010 rubber rupsbanden toegepast, waarmee de bodemdruk ondanks de hoge wiellasten van ca. 16000 kg toch aanzienlijk teruggebracht kon worden tot ca. 100 kPa (1 bar).

Als gevolg van de ontwikkeling van de gewichten en de banduitrusting van topsegment machines bleef de piekspanning in de grond op 25 cm diepte in 2010 gemiddeld ca. 230 kPa, gelijk aan die in 1980. De hoogste voorkomende piekspanning (bij conventioneel ploegen) nam iets toe van 542 kPa naar 565 kPa. De piek-grondspanningen op 40 cm diepte namen van 1980 tot 2010 gemiddeld toe van 138 kPa naar 150 kPa en maximaal van 311 kPa naar 343 kPa. Op 50 cm diepte namen de piek-grondspanningen gemiddeld toe van 97 kPa naar 117 kPa en maximaal van 209 naar 251 kPa.

De samenvattende conclusie van het onderzoek is dat de bodembelasting in de ondergrond, uitgedrukt in gemiddeld en maximaal voorkomende piek-grondspanningen, van 1980 tot 2010 ongeveer gelijk gebleven is op 25 cm diepte, 10% is toegenomen op 40 cm diepte en 20% is toegenomen op 50 cm diepte. Daarmee is ook het risico op verdichting van de ondergrond in de afgelopen 30 jaar duidelijk toegenomen.

Mogelijke maatregelen en aanbeveling om de belasting van de ondergrond te beperken

Door drie innovaties die in 2010 in de praktijk al in enkele topmodel machines 2010 werden toegepast, zijn er juist voor de meest bodembelastende veldwerkzaamheden meer mogelijkheden dan in 1980 om de belasting van de ondergrond te verlagen. Deze methoden betreffen: 1) het bovenoverploegen in plaats van “door de voor” ploegen; 2) de toepassing van een aanvoersleepslang bij de toediening van drijfmest in plaats van het rijden met een mesttank over het veld en 3) de toepassing van rubber rupsen in plaats van banden op zware oogstmachines.

Aanbevolen wordt om uitbreiding van de toepassing van deze innovaties te stimuleren en daarmee de belasting van de ondergrond en het risico op verdere verdichting van de ondergrond in de toekomst te verlagen.

7. Bronnen

- Akker, J.J.H. van den, F. de Vries, G.D. Vermeulen, M.J.D. Hack-ten Broeke & T. Schouten, 2012.
Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen, Alterra, Alterra Rapport 2409
- Anonymus, 2008.
Folderoverzicht museum Historische Landbouwtechniek. Catalogus brochures, folders en handleidingen verzameld en gerubriceerd door medewerkers van het museum Historische Landbouwtechniek, van 1980 tot 2008 gevestigd aan de Droevendaalsesteeg in Wageningen, 487 p. Folders thans aanwezig in bibliotheek WageningenUR, afd. speciale collecties.
- Commissie van de Europese Gemeenschappen, 2006.
Thematische strategie voor bodembescherming van de Commissie van de Europese Gemeenschappen, COM (2006) 231, Brussel.
- Hoenderken, J.A., J. Terpstra & G. Kiers, 1980.
Enkele technische gegevens van wieltrekkers in de landbouw. Bijlage bij *Landbouwmechanisatie* van januari 1980, 24 p.
- Hoenderken, J.A., 2009.
Sneller met drieassers. Technische gegevens. *Landbouwmechanisatie* 60 (12): 28-32.
- IRS, 2010.
Weights sugar beet harvesters with full and empty tank (kg) measured at the international sugar beet harvesting demonstration, Beet Europe, Lelystad.
- Kennisakker website, 2012.
<http://www.kennisakker.nl/advies/bandenkeuze>
- Knuivers, M., 2009.
De perfecte ploeg bestaat niet. Elf ploegen getest in klei. *Boerderij* 95 (5): 34-45.
- Kouwenhoven, J.K. & G.D. Vermeulen, 1977.
Vermogensbehoefte bij de hoofdgrondbewerking. *Landbouwmechanisatie* 28: 1351-1353.
- Perdok, U.D. & W.B.M. Arts, 1986.
Het landbouwbandenboek. Wageningen, Stichting Landbouwmechanisatie-pers, 42 p.
- Söhne, W., 1953.
Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik* 5: 49-63.
- Sleutel, R., 2012.
De voors en tegens van bovenover ploegen. Met het wiel uit de voor. *Landbouwmechanisatie* 63 (3): 32-33.
- Technische Commissie Bodem, 2011.
Advies bodemverdichting. TCB, Den Haag, 15 p. + bijlagen.
- Van Hattum, B. & A.J. Blomsma, 2008.
Nieuwe maaidorsers; groter en slimmer. *Trekker & Werktuig* 240: 30-31.
- Van den Akker, J.J.H. & T. Hoogland, 2011.
Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands. *Soil & Tillage Res.* 114: 146-154.
- Van de Zande, J.C., 1983.
Berijding en bodemverdichting van bouwland op West-Zuid-Beveland. Wageningen, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, ICW nota 1462, 51 p. + bijlagen.
- Van der Meer, W., redactie Trekker & M. Smits, 2008.
Trekker Jaarboek 2009. Doetinchem, Reed Business, Agriboek, 177 p.
- Vermeulen, G.D., 1975.
Vermogensbehoefte bij de hoofdgrondbewerking. Landbouwhogeschool Wageningen, Laboratorium voor grondbewerking, Ingenieursscriptie, 35 p.
- Vermeulen, G.D. & J.J.H. van den Akker, 2010.
Ontwikkeling van bodembelasting door landbouwmachines 1980-2010. Presentatie voor de begeleidingsgroep van het onderzoekprogramma "Bodem en kaderrichtlijn water" van het Ministerie van EL&I, Utrecht, 23 december 2010.

Vermeulen, G.D. & B.R. Verwijs, 2007.

Inventarisatie van beschikbare techniek voor oogst en transport met lage bodemdruk. Wageningen, Plant Research International, PRI rapport 163, 48 p.