

Bodemverdichting: ondergrond en bovengrond

Fact finding paper voor de Raad voor Leefomgeving en Infrastructuur (RLI) voor het advies Vitale Bodem - Jan van den Akker (WUR)

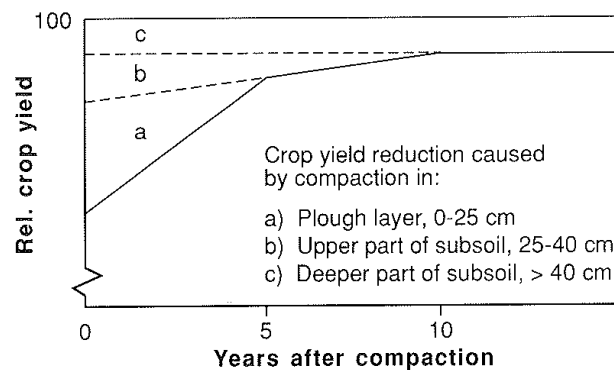
Bodemverdichting wordt gedefinieerd als verdichting en vervorming van de bodemstructuur, gewoonlijk als gevolg van mechanische spanningen. Deze spanningen worden in het algemeen veroorzaakt door wiellasten van landbouwvoertuigen. Deze wiellasten zijn niet alleen verticaal, maar vooral bij aangedreven wielen treden ook horizontale afschuifspanningen op, om bijvoorbeeld de trekkracht te leveren bij ploegen. Verdichting veroorzaakt een afname van de totale en luchtgevulde porositeit door het ineendrukken van het bodemvolume. Vervorming veroorzaakt structuurverlies, waarbij de continuïteit van doorgaande poriën wordt verstoord en er een homogene structuurloze grond ontstaat. Belangrijke bodemeigenschappen zoals water- en luchtdoorlatendheid, infiltratiecapaciteit, berging van water, bewortelbaarheid en zuurstofvoorziening door diffusie nemen door verdichting sterk af. Daardoor heeft verdichting een verlagende werking op de productiviteit en biologische activiteit van de bodem en treden bovendien verliezen van nutriënten op en wordt circulaire landbouw slechter mogelijk. Door de afgenomen infiltratiecapaciteit en doorlatendheid voor water bestaat er een verhoogd risico op bodemerosie en verlies van voedingsstoffen als gevolg van afstroming en denitrificatie. Natte gronden zijn zwakker en gevoeliger voor verdichting dan droge gronden.

Bij de meeste gronden kan een bovengrond en een ondergrond worden onderscheiden, waarbij de bovengrond zich ten opzichte van de ondergrond kenmerkt door een hoger organisch stofgehalte, veel meer beworteling en bodemleven en een lossere structuur. Bij landbouwgronden die jaarlijks worden geploegd of losgemaakt is dit onderscheid het duidelijkst. De bovengrond is de belangrijkste bodemlaag voor de planten aangezien het grootste deel van hun wortels in de bovengrond groeit en daar het meeste water en nutriënten worden onttrokken. Ook wisselwerkingen van de bodem met de atmosfeer (zuurstofvoorziening en vorming en uitwisseling van gas) vindt voornamelijk plaats in de bovengrond. De bovengrond heeft daarnaast als taak om de inwerking van regendruppels en wind te absorberen en het regenwater vast te houden en bij overmaat naar diepere bodemlagen te transporteren zonder afstroming via het oppervlak.

Het is noodzakelijk dat een aantal plantenwortels in de ondergrond doordringen om in droge perioden de grond te exploiteren voor water, om de uit de bovengrond geloogde voedingsstoffen te onttrekken en om nieuwe macro-poriën (kanalen) voor watertransport te vormen. De tweede belangrijke functie van de ondergrond is om water naar dieper gelegen bodemlagen te transporteren. Verdichting van de ondergrond heeft een negatief effect op zowel bewortelingsdiepte als infiltratiecapaciteit.

De ondergrond omvat de zogeheten ploegzool, dit is het bovenste gedeelte van de ondergrond. De ploegzool wordt vaak veroorzaakt door tractorbanden die tijdens het ploegen over de ondergrond rijden en door hoge wiellasten, vooral als daarnaast ook de bandspanningen hoog zijn en er onder te natte omstandigheden wordt gereden. Hierbij zal er naast verdichting door berijden van te natte grond sprake zijn van slip wat een oppervlakkige verdichting van de bereiden bodemlaag veroorzaakt. De ploegzool kan veel slechter doordringbaar zijn voor wortels, water en zuurstof dan de daaronder gelegen grond en beperkt daardoor het functioneren van de ondergrond. Anders dan de bovengrond wordt de ondergrond niet jaarlijks losgemaakt omdat de kosten hoog zijn, goede (droge) omstandigheden voor losmaken van de ondergrond zeldzaam zijn en vaak negatieve effecten kunnen worden verwacht. Ondergrondverdichting is daarom een doorlopend cumulatief proces, dat op de lange duur resulteert in een homogeen verdichte ondergrond. De weerstand van de ondergrond tegen verdichting is laag en verdichting van de ondergrond is tenminste deels blijvend (zie figuur 1). Figuur 1 laat een essentieel aspect van bodemverdichting zien, namelijk dat herstel van een verdichte bodem een langdurig proces is, waarbij de diepere

ondergrond praktisch niet meer hersteld. Daarom is voorkomen van verdichting van de ondergrond een essentiële factor voor duurzame landbouw op de lange termijn en wordt daarom in deze notitie vooral aandacht besteed aan verdichting van de ondergrond. Daarbij moet worden bedacht dat anders dan in de veldproeven waarop Figuur 1 is gebaseerd, in de praktijk elk jaar de grond herhaaldelijk met geregeld zware wiellasten wordt bereiden. Herstel van de ploegzool



Figuur 1. Effect van boven- en ondergrondverdichting op de oogstbrengst. Geschematiseerd resultaat van een uitgebreide internationale reeks van veldproeven waarbij éénmalig een perceel wiel-aan-wiel vier maal is bereiden met wiellasten van 5 ton. In de daarop volgende jaren is alleen met lichte wiellasten gereden om het herstel van de bodem te kunnen bestuderen. Onderscheid is gemaakt in het herstel van de bovengrond (a), de ploegzool (b) en de diepere ondergrond (c). (Uit Håkansson and Reeder (1994)).

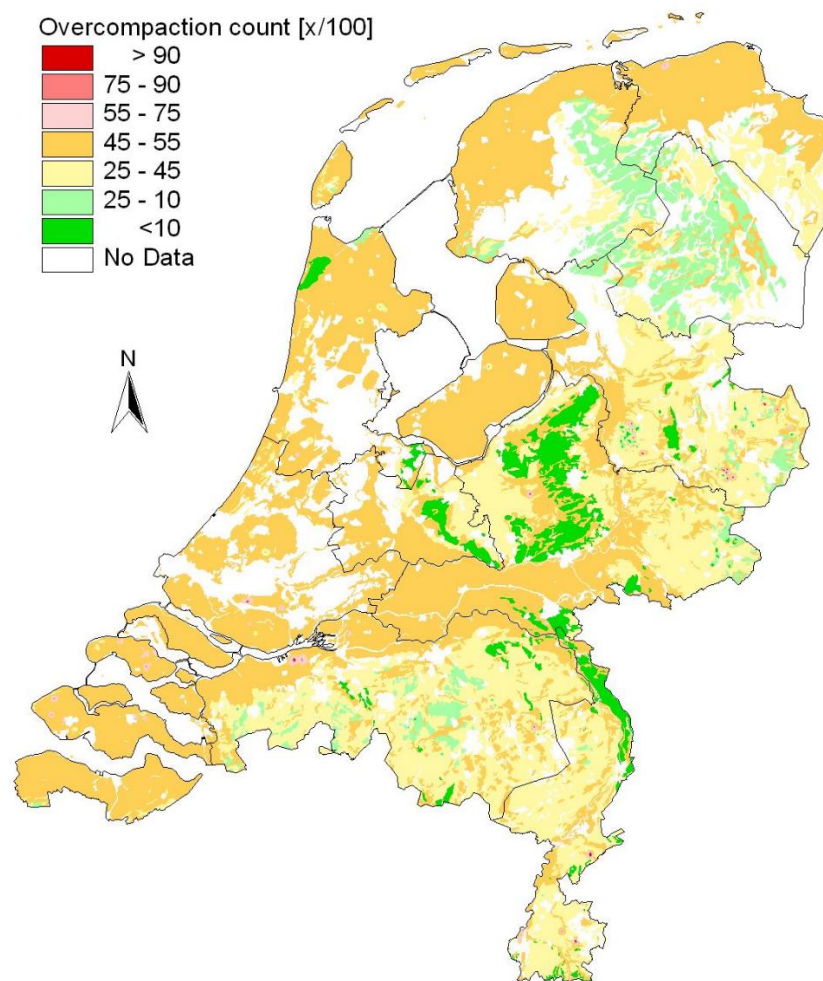
zal daarom zeer beperkt zijn, zodat de beperking van de gewasopbrengst ongeveer 5% zal zijn. Tijink et al. (1990) gaven al in 1990 aan dat de wielbelastingen bietenrooiers 7,5 tot 10 ton waren. Inmiddels zijn de wiellasten van tegenwoordig nog hoger en kunnen meer dan 13 ton zijn. De schade aan de bodem zal dan ook groter zijn dan Håkansson and Reeder (1994) aangeven. Voorhees (2000) voerde in Minnesota (USA) dezelfde veldproeven uit als in Figuur 1, maar dan met wiellasten van 9 ton in plaats van 5 ton. Dit resulteerde in een permanente langetermijnafname (deel c in figuur 1) van de maïsopbrengst van 6%. Ook hier zal de ploegzool nauwelijks herstellen, zodat geschat wordt dat de min of permanente ondergrondverdichting (deel b plus c) leidt tot een opbrengstderving van ca 10%. Preventie van ondergrondverdichting is daarom ook noodzakelijk om de herstelmechanismen een kans en tijd te geven om effectief te zijn.

Bodemverdichting van de bovengrond kan effectief worden losgemaakt door te ploegen. Dit heeft als nadeel dat dit ten koste gaat van een deel van het bodemleven. Daarom wordt ook wel niet-kerende grondbewerking (NKG) toegepast, waarbij de bovengrond ondiep wordt losgetrokken met woelers. Natuurlijke herstelprocessen zijn vorst en vriesdrogen, uitdrogingskrimp en zwel, beworteling en bodemleven. Vorst heeft alleen in de bovengrond effect. In de bovengrond zijn beworteling en bodemleven effectief, maar vaak zijn de omstandigheden in de ploegzool door zijn dichtheid suboptimaal of slecht en soms zelfs onmogelijk voor beworteling en bodemleven. Uitdrogen kan tot wat grotere diepten effect hebben, zelfs als de ondergrond al is verdicht. Zandgronden en lichte zavelen krimpen niet of zeer beperkt, waardoor het herstelvermogen van deze lichte gronden sterk wordt beperkt. Organische stof kan deze lichte gronden krimpvermogen geven en geeft deze gronden letterlijk veerkracht bij belasting door wielen. Organische stof bevordert bovendien het bodemleven en maakt beworteling eerder mogelijk. Het organisch stofgehalte in de ondergrond is echter in de meeste gevallen te laag om effectief te zijn. Als laatste mogelijkheid kan woelen tot net onder de verdichte laag worden overwogen. Dit is relatief duur en de effectiviteit van woelen valt vaak tegen omdat door het woelen de nog bestaande doorgaande poriën worden verstoord en de losgemaakte grond gemakkelijk herverdicht tot soms nog hogere dichtheden (Kooistra en Boersma, 1994). Woelen moet daarom alleen worden toegepast indien

daarna maatregelen worden getroffen om de ondergrond weer sterkte en doorgaande poriën te geven door diepwortelende gewassen.

Mate en ernst van ondergrondverdichting in Nederland

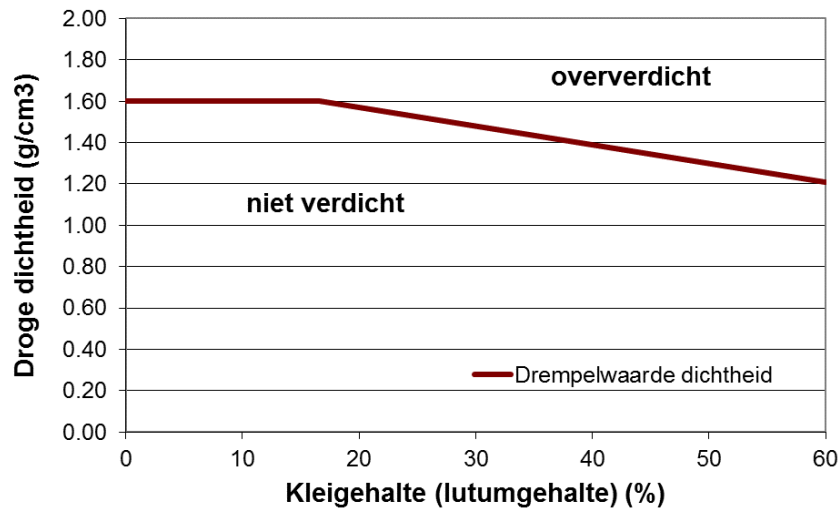
Een goed opgezette systematische inventarisatie van voldoende grootte van de verspreiding en ernst van ondergrondverdichting heeft in Nederland nooit plaatsgevonden. Wel is er een analyse van de dichtheidsgegevens uit het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS) uitgevoerd in 2010 (Van den Akker en Hoogland, 2011) en een beperkte inventarisatie gebaseerd op 128 punten (Brus en Van den Akker, 2018, Van den Akker et al., 2014, Van den Akker en Hendriks, 2015). De resultaten zijn gegeven in figuur 2 en 3. Figuur 2 laat zien dat in een groot deel van de Nederlandse ondergronden de limietwaarden voor toelaatbare dichtheden wordt overschreden.



Figuur 2. Oververdichting ondergrond in 2010 gebaseerd op dichtheden uit het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS) van 1960 – 2010. De term oververdichting in de figuur geeft aan dat de grond zo sterk is verdicht dat ernstige problemen met de indringingsweerstand, de luchthuishouding of doorlatendheid optreden. Het aantal 'counts' geeft aan in hoeveel locaties de ondergrond oververdicht is indien 100 locaties worden bemonsterd (Van den Akker en Hoogland, 2011).

Deze maximaal toelaatbare dichtheid (drempelwaarde) is $1,6 \text{ g/cm}^3$ voor zand en lichte zavel met een laag organisch stofgehalte (zoals in het algemeen het geval is bij deze ondergronden). Een lichte zavel is de overgang van zandgrond naar kleigrond en heeft maximaal een kleigehalte van 17,5%. Zwaardere gronden (met een kleigehalte $> 17,5 \%$) met een hoge dichtheid zijn

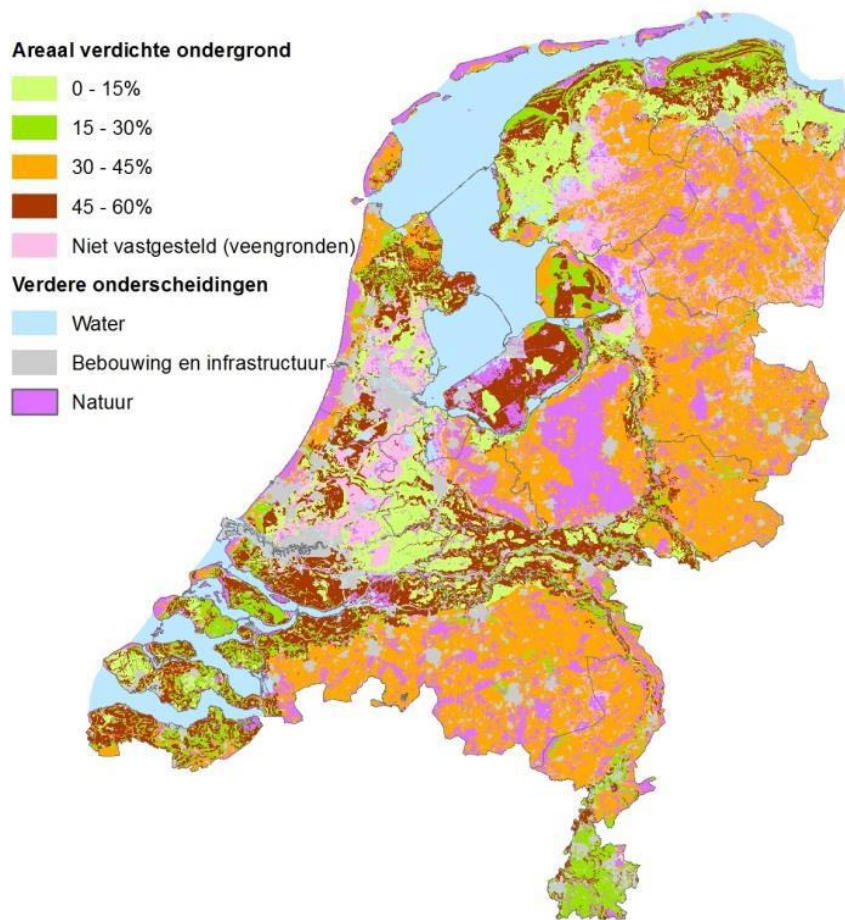
aanzienlijk massiever en ondoordringbaarder voor wortels dan een zandgrond met dezelfde dichtheid. Voor zwaardere gronden is daarom de drempelwaarde: $1,75 - 0,009 C$, waarin C het kleigehalte in procenten. Dit is grafisch aangegeven in figuur 3. Door de gevonden droge dichtheid in een punt te delen door de drempelwaarde wordt de relatieve dichtheid berekend. Een relatieve dichtheid groter dan 1.0 betekent dat de grond oververdicht is.



Figuur 3. Grafische voorstelling van de drempelwaarde voor verdichting afhankelijk van het kleigehalte (lutumgehalte). De drempelwaarde is de maximaal toelaatbare droge dichtheid van een grond. De droge dichtheid is de dichtheid van gedroogde grond. De grond is oververdicht indien de droge dichtheid groter is dan de drempelwaarde (de rode lijn in de grafiek)

Uit het onderzoek van Van den Akker en Hoogland (2011) volgde ook dat door de toenemende wiellasten de dichtheid van de ondergrond in de loop der tijd geleidelijk toeneemt. Door met deze trendmatige toename rekening te houden kon uit de dichtheden die in de periode 1960 tot 2010 zijn gemeten de dichtheidstoestand in 2010 worden berekend. Geconcludeerd werd dat ca 50% van het oppervlakte aan meest vruchtbare gronden van Nederland een te dichte ondergrond hebben.

In figuur 4 zijn de ge-extrapoleerde resultaten van dichtheidsmetingen in drievoud op 128 locaties te zien (Van den Akker et al., 2014, Van den Akker en Hendriks, 2011, Brus en Van den Akker, 2018). De locaties zijn random gekozen, waarbij rekening is gehouden dat de locaties evenredig naar het oppervlakte met een bepaalde risicoklasse op verdichting werd verdeeld (Brus en Van den Akker, 2018). De provincies Gelderland, Brabant en Zeeland hebben daarbij extra veel locaties omdat deze het project aanvullend financierden. Uit de inventarisatie blijkt dat 45% van het oppervlakte Nederlandse ondergronden oververdicht is. Voor de provincies Gelderland, Brabant en Zeeland zijn deze percentages respectievelijk 62%, 67% en 43%. Bedacht moet worden dat het aantal locaties laag is, waardoor de betrouwbaarheidsmarges groot zijn. De resultaten bevestigen wel zo ongeveer de conclusie uit de studie gebaseerd op de dichtheden in BIS dat ca 50% van de Nederlandse ondergronden oververdicht zijn.



Figuur 4. Oververdichting ondergrond in 2013 gebaseerd op dichtheden gemeten op 128 punten in Nederland. (Van den Akker en Hendriks, 2011, Brus en Van den Akker, 2018).

Tabel 1 presenteert voor de verschillende grondsoorten het percentage van de steekproeven die een verdichte ondergrond aangegeven. Bedacht moet worden dat de tabel is gebaseerd op slechts 128 locaties. De steekproef is daarom te grof om goed uitspraken te doen. Dit wordt geïllustreerd met het feit dat slechts bij 28,6% van de lichte zavel ondergronden een te hoge dichtheid wordt gemeten, terwijl het een bekend feit is dat lichte zavel erg verdichtingsgevoelig is en nauwelijks herstelvermogen heeft. De praktijk leert dan ook dat de meeste lichte zavel ondergronden sterk zijn verdicht.

Tabel 1. Grondsoort en gemeten verdichting (uit Van den Akker et al., 2014). Matig Zware Klei en Zware Klei kennen minder oververdichting dan de resterende grondsoorten. Alleen lichte zavel lijkt ook minder verdichting te kennen. Dit laatste is in tegenspraak met de ervaring.

| Totaal | Relatieve dichtheid | | | Droge dichtheid (kg/m ³) | | | Verdicht (%) |
|------------------|---------------------|--------|---------|--------------------------------------|--------|---------|--------------|
| | Gem. | St.Dev | Mediaan | Gem. | St.Dev | Mediaan | |
| Zand | 0.97 | 0.11 | 0.98 | 1549 | 175 | 1572 | 41.1 |
| Lichte zavel | 0.94 | 0.11 | 0.96 | 1503 | 175 | 1534 | 28.6 |
| Zware Zavel | 0.96 | 0.13 | 0.98 | 1498 | 208 | 1523 | 52.9 |
| Lichte Klei | 0.98 | 0.08 | 0.96 | 1458 | 137 | 1446 | 41.2 |
| Matig Zware Klei | 0.91 | 0.11 | 0.88 | 1298 | 178 | 1282 | 14.3 |
| Zware Klei | 0.75 | 0.16 | 0.77 | 960 | 208 | 972 | 0.0 |
| Totaal | | | | | | | 37.2 |

Tabel 2. Landgebruik en gemeten verdichting. Heide en natuurgraslanden, bos, boomgaarden en gras lijken minder oververdichting te hebben dan akkerbouwgewassen.

| Landgebruik | Relatieve dichtheid | | | Droge dichtheid (kg/m ³) | | | Verdicht (%) |
|-------------------------|---------------------|--------|---------|--------------------------------------|--------|---------|--------------|
| | Gem. | St.Dev | Mediaan | Gem. | St.Dev | Mediaan | |
| Heide en natuurgrasland | 0.83 | 0.19 | 0.94 | 1198 | 375 | 1432 | |
| Bos | 0.95 | 0.07 | 0.95 | 1514 | 119 | 1514 | |
| Boomgaard | 0.86 | 0.21 | 0.92 | 1342 | 353 | 1428 | |
| Gras | 0.93 | 0.14 | 0.96 | 1437 | 230 | 1479 | 35 |
| Mais | 0.98 | 0.09 | 0.99 | 1550 | 165 | 1577 | 45 |
| Graan | 1.00 | 0.07 | 1.00 | 1576 | 87 | 1582 | 47 |
| Rooivruchten | 0.99 | 0.08 | 0.99 | 1549 | 125 | 1568 | 43 |
| Gras en Mais | 0.94 | 0.13 | 0.97 | 1469 | 218 | 1512 | 37 |
| Akkerbouw | 0.99 | 0.07 | 0.99 | 1559 | 113 | 1572 | 44 |

In tabel 2 zijn de relatieve dichtheden en de dichtheden gegeven per landgebruik. De relatieve dichtheid geeft hier de meeste informatie. Akkerland blijkt de meeste ondergrondverdichting te hebben. Dit komt overeen met de praktijkervaring. Bedacht moet worden dat zwaardere gronden relatief vaker in grasland liggen omdat deze niet of minder geschikt zijn voor rooivruchten (aardappelen, suikerbiet, peen). Ook boomgaarden zijn vaker gesitueerd op de zwaardere gronden. Het percentage "verdicht" is bij het landgebruik "Heide en natuurgraslanden", "Bos" en "Boomgaard" weggelaten omdat te weinig punten in deze categorieën vielen om zinnige uitspraken te doen. Er is dus een wisselwerking tussen de grondsoort in tabel 1 en het landgebruik in tabel 2. Dat op zware klei geen ondergrondverdichting wordt gevonden wordt waarschijnlijk sterk beïnvloed door het feit dat zware klei meestal in grasland ligt of voor boomgaarden wordt gebruikt. Net als bij tabel 1 geldt hier dat de steekproef feitelijk te klein is om eenduidige uitspraken te doen.

De steekproef met 128 locaties had ook tot doel om een kaart "Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik" te testen (zie figuur 5). Deze kaart is gebaseerd op het landgebruik in 2010 afgeleid van een serie bestanden van het Landelijke Grondgebruiksbestand Nederland (LGN). Aan het landgebruik worden maatgevende machines en wiellasten gekoppeld en deze zijn bepalend voor de uiteindelijke bodembelasting. De wiellasten van de meest gebruikte zware mechanisatie en de sterkte van de verschillende grondsoorten (Van den Akker et al, 2013a) werden gebruikt om met het model SOCOMO (Van den Akker, 2004) te berekenen of de ondergrond direct onder de bovengrond (bouwvoor) de wiellast kan dragen (Van den Akker et al., 2013a en 2013b). Hierbij werden de berekeningen uitgevoerd voor vrij natte en vochtige grond. Daarnaast is rekening gehouden met een aantal factoren die de grond meer of minder kwetsbaar maken voor ondergrondverdichting:

1. Ondergronden die van nature al dicht zijn en nooit los zijn gemaakt omdat dat niet mogelijk is of zinloos en veenondergronden, die van nature zeer veerkrachtig zijn en een groot herstelvermogen hebben;
2. De sterkte van de ondergrond op 40 cm diepte (daaronder wordt natuurlijk herstel moeilijker);
3. De grond wordt niet overal bereden, zoals bijvoorbeeld in boomgaarden;
4. Factoren die de grond extra verdichtingsgevoelig maken en/of natuurlijk herstel bemoeilijken, bijvoorbeeld gronden met hoge grondwaterstanden;
5. Factoren die de grond minder gevoelig voor verdichting maken, zoals lage grondwaterstanden, goede mogelijkheden voor natuurlijk herstel of omdat belangrijke eigenschappen zoals de doorlatendheid niet of nauwelijks door verdichting worden beïnvloed (bijvoorbeeld grof zand). Ondergronden met meer dan 17,5 % kleideeltjes kunnen door krimp deels herstellen. Dit geldt in zekere mate ook voor ondergronden met meer dan 3% organische stof. Verder levert organische stof ook (mechanische) veerkracht waardoor verdichting wordt beperkt.

Het bleek dat bijna alle ondergronden niet sterk genoeg zijn om de wiellasten in de landbouw zonder verdichting te dragen. De meeste ondergronden zouden alleen op het sterktecriterium onder de categorie "zeer groot risico op verdichting" vallen. Alleen factoren die de grond minder gevoelig maken voor verdichting, maken een verschuiving naar categorieën met een lager risico mogelijk. Belangrijk daarbij was de mogelijkheid van natuurlijk herstel. Een belangrijke conclusie is dan ook dat zonder natuurlijk herstel bijna alle Nederlandse ondergronden in de loop der tijd alleen maar dichter worden en de ondergrondverdichting steeds meer een permanent karakter zou krijgen.

Uit de steekproef op 128 locaties blijkt dat in de risicocategorieën "zeer groot", "groot" en "matig" ongeveer 50% van de ondergronden te dicht is (Van den Akker et al., 2014, Brus en Van den Akker, 2018). Waarschijnlijk is een belangrijke oorzaak voor het feit dat er geen significante verschillen worden gevonden tussen deze drie risicocategorieën, dat in Nederland met zijn korte gewasrotatie met veel rooivruchten de ondergrond te weinig tijd krijgt om te herstellen. In de risicocategorieën "beperkt" en "zeer beperkt" werden geen te dichte ondergronden gevonden. Ondanks het feit dat de steekproef aangeeft dat er geen onderscheidt kan worden gemaakt in de drie hoogste risicocategorieën, blijft de risicokaart van belang omdat deze aangeeft welke gronden bij voldoende preventie meer of minder mogelijkheden hebben voor natuurlijk herstel.

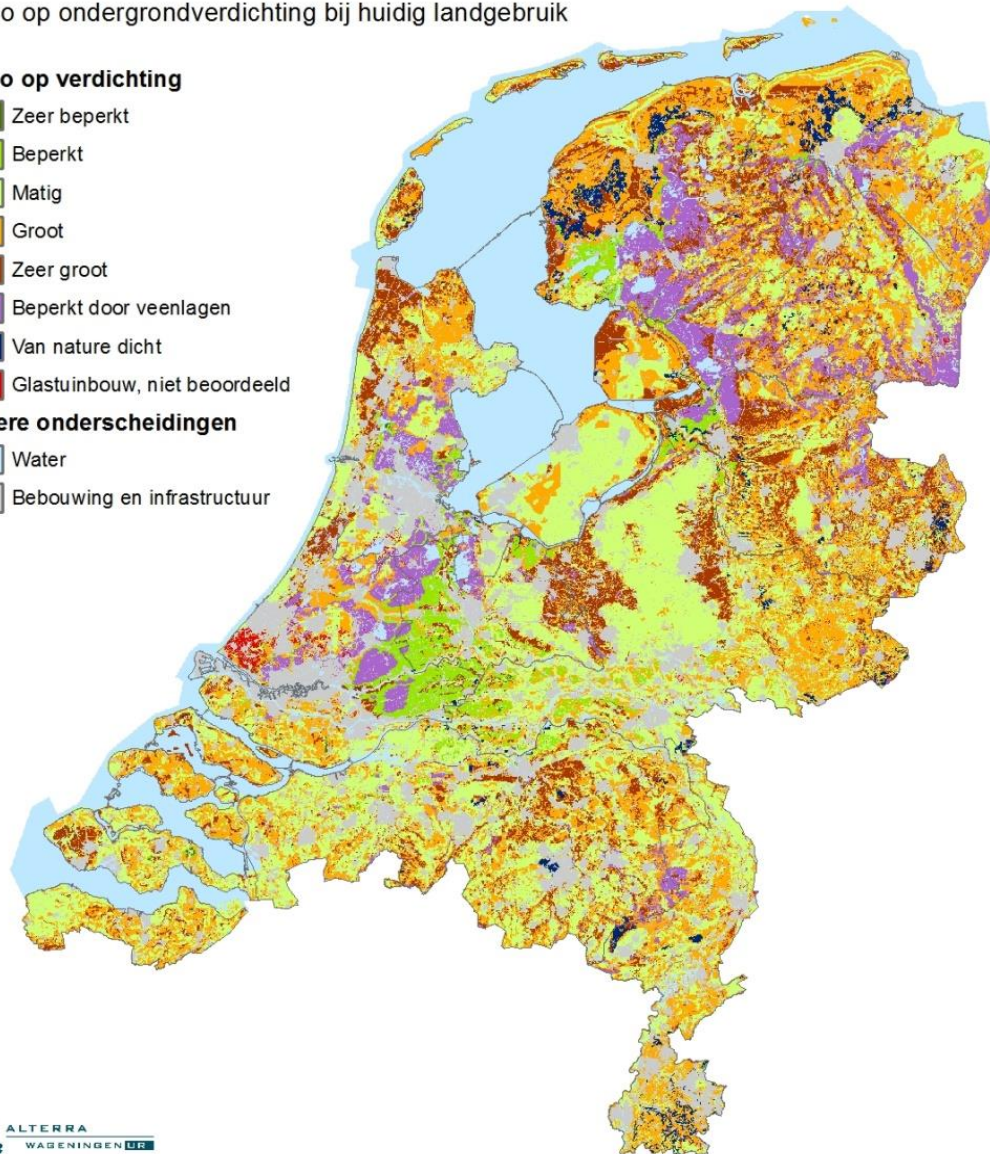
Risico op ondergrondverdichting bij huidig landgebruik

Risico op verdichting

-  Zeer beperkt
-  Beperkt
-  Matig
-  Groot
-  Zeer groot
-  Beperkt door veenlagen
-  Van nature dicht
-  Glastuinbouw, niet beoordeeld

Verdere onderscheidingen

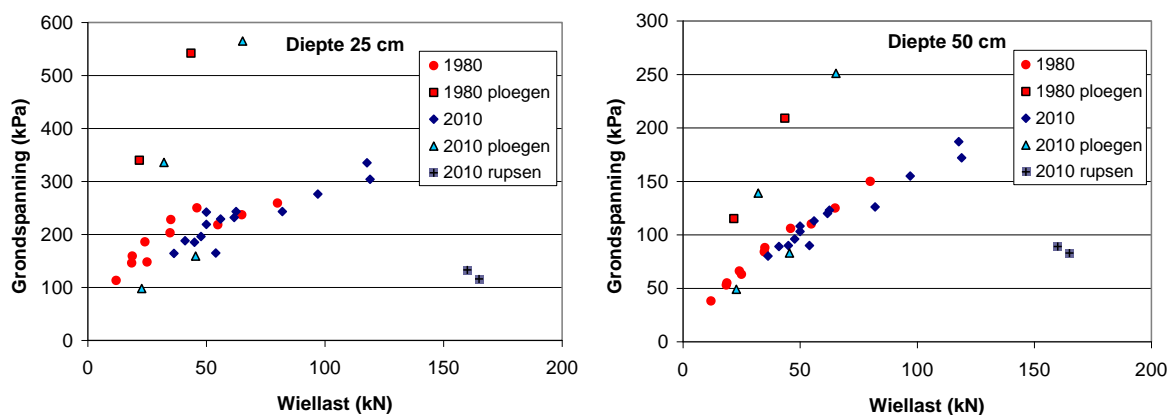
-  Water
-  Bebouwing en infrastructuur



Figuur 5. Risico op ondergrondverdichting bij het landgebruik in 2010

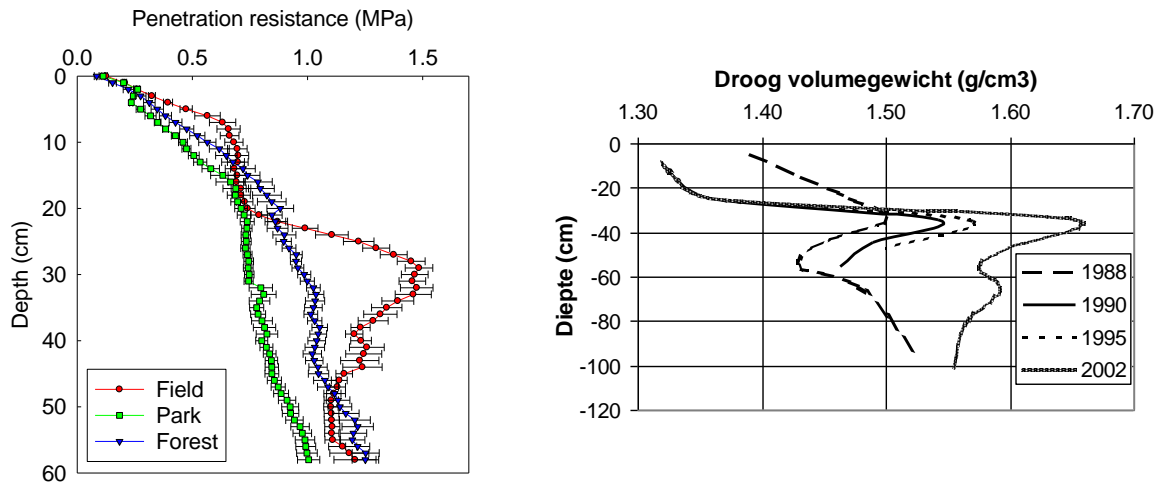
De trend is toenemende ondergrondverdichting, maar het kan anders

De algemene gedachte is dat door de steeds zwaarder wordende mechanisatie de wiellasten toenemen en daardoor ook de ondergrondverdichting. Daar wordt tegenover gesteld dat tegenwoordig grote en brede lagedrukbanden worden gebruikt. Door Vermeulen et al., (2013) is een vergelijking gemaakt van de bodembelasting bij agrarisch veldwerk in 1980 en 2010. Voor het meest voorkomende landgebruik zijn de in 1980 en 2010 veel gebruikte zware, maar wel veel gebruikte landbouwmachines met elkaar vergeleken wat betreft wiellasten en gebruikte banduitrusting met de daaruit volgende minimaal noodzakelijke bandspanning. Vervolgens is met bodemverdichtingsmodel SOCOMO (Van den Akker, 2004) berekend wat de maximale grondspanningen zijn op 25 en 50 cm diepte. Dit is dus op ploegzoldiepte en de diepte net onder de ploegzool. De resultaten zijn gegeven in figuur 6.



Figuur 6. Toename van kenmerkende wiellasten in de periode 1980 – 2010 en daaruit volgende verticale grondspanningen berekend met SOCOMO op een diepte van 25 cm en 50 cm. NB de verticale assen met grondspanningen verschillen (uit Vermeulen et al., 2013).

Het blijkt dat in de periode 1980 – 2010 de wiellasten flink zijn toegenomen. Wel zijn meer en meer lagedrukbanden toegepast, maar de grotere banden maakten het mogelijk om de machines groter te maken, wat echter tot gevolg had dat ook de bandspanningen moesten worden verhoogd om die grotere wiellast te dragen. Hoewel in het algemeen de bandspanningen in 2010 wel iets lager zijn dan in 1980, blijken uiteindelijk de grootste grondspanningen op een diepte van 25 en 50 cm in 2010 duidelijk hoger te zijn dan in 1980. Uit figuur 6 blijkt ook dat in de open voor rijden tijdens het ploegen tot zeer hoge grondspanningen leidt op 25 en 50 cm diepte. Toepassing van rupsbanden kan resulteren in lagere grondspanningen. De hogere grondspanningen in 2010 leiden onvermijdelijk tot meer ondergrondverdichting. Dit is in overeenstemming met de gevonden trend van toenemende bodemdichtheid die werd gevonden in de eerder vermelde analyse van de dichtheidsgegevens uit het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS) (Van den Akker en Hoogland, 2011). Deze trend van toenemende dichtheid is internationaal, zoals blijkt uit figuur 7 van Schjønning et al., (2009), waarin de indringweerstand van een lichte zavel in een park en een bos is vergeleken met de indringweerstand gemeten in een landbouwgrond. De indringweerstand in de landbouwgrond is veel hoger dan in het onbereden park en toont een duidelijke ploegzool. De indringweerstand in het park kan worden beschouwd als de indringweerstand zoals het voor de zware gemechaniseerde landbouw is geweest. Figuur 8 van Ehlers et al., 2003 laat zien hoe de indringweerstand op een perceel met suikerbieten in de loop der tijd sterk toeneemt bij toenemende wiellasten van 45 kN in 1988 en 1990 tot 100 kN in 2001.



Figuur 7. Indringweerstand gemeten in een park (Barritskov Manor) in Denemarken (lichte zavel) zonder berijding, een bos en in een landbouwkundig perceel. De spreiding is aangegeven ($n=40$). (Uit Schjønning et al. (2009)).

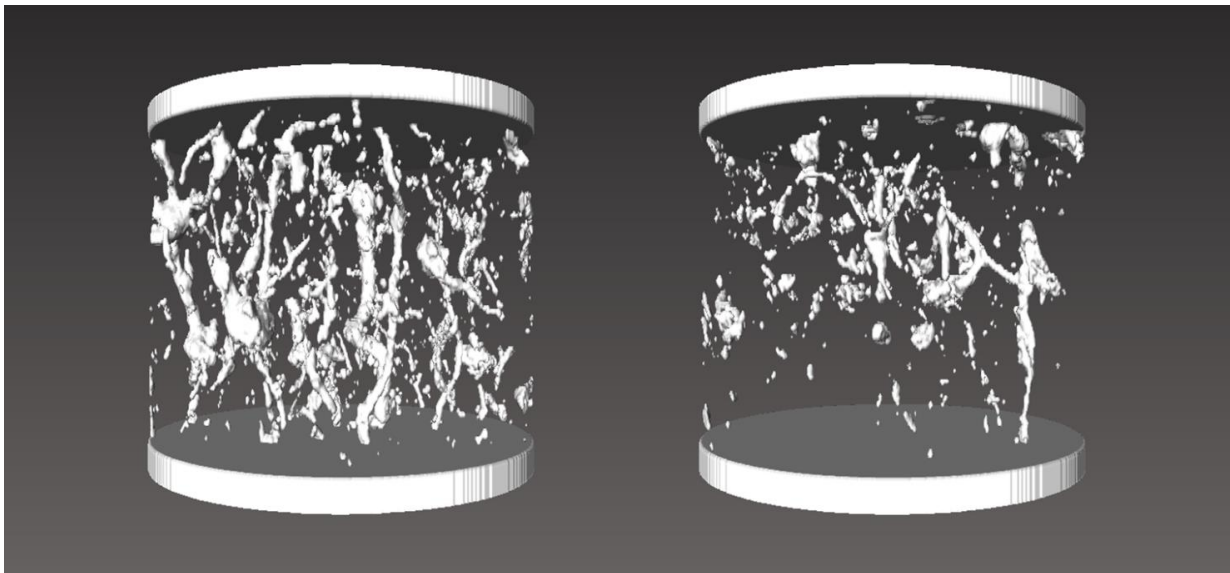
Figuur 8. Toename van het droge volumegewicht van een lössgrond door toename van de wielbelastingen in de loop der tijd (1988 - 2002). In 2002 werden de monsters genomen op vooraf gekozen locaties met de hoogste indringweerstand. Volumegewichten van meer dan 1,6 g/cm3 resulteren in een sterke afname van de bewortelbaarheid en waterdoorlatendheid (Ehlers et al., 2003).

Naast de sterke mechanisering van de landbouw is er ook een druk om meer (geld) van een hectare land te krijgen, al was het maar om de mechanisering en schaalvergroting te betalen, terwijl anderzijds er een voortdurende druk bestaat op productprijzen. Daarnaast wordt de druk van de afnemers van de producten steeds groter, waarbij tijd is geld en niet te vroeg en niet te laat leveren een hoofdrol speelt. Levertijden worden steeds krappere en anderzijds moeten veelal loonwerkers worden ingeschakeld om het product in die tijd van het land te krijgen. De afstemming van landbouwer, afnemer en loonwerker moeten nauw op elkaar aansluiten, terwijl de oogstmogelijkheden juist sterk afhankelijk zijn van het moeilijk voorspelbare weer. Het wordt daardoor steeds onvermijdelijker dat ook onder minder gunstige (nattere) en soms zelfs slechte omstandigheden wordt geoogst met diepe verdichting en structuurbederf tot gevolg. Van oudsher heeft de landbouwer een zorg om zijn land en streeft naar behoud en verbetering van de bodemkwaliteit van zijn land. Door leveringscontracten, tijdelijk verpachten, te lage financiële reserves, weersomstandigheden en door het feit dat een verloren oogst tot de ondergang van het bedrijf kan leiden, wordt een keus voor de langere termijn en behoud van bodemkwaliteit te vaak onmogelijk. Een en ander heeft ook tot gevolg dat indien onder slechtere omstandigheden moet worden geoogst, gehuurd of kort gepacht land logischerwijs eerder wordt "opgeofferd" dan het eigen land. We zien dan ook dat verhuurd land of kort verpacht land meer en diepere ondergrondverdichting heeft dan land in eigen bezit.

Mogelijkerwijs stopt de trend van steeds verdergaande ondergrondverdichting, want in de landbouw wordt men zich steeds meer bewust van de nadelen van ondergrondverdichting. De beperktere bewortelingsdiepte en infiltratiecapaciteit leidt bij extremere klimaatomstandigheden tot meer en grotere droogte- en natschade. Oplossingen in de vorm van meer beregening, meer nutriënten (stikstof), meer drainage en diepere slotpeilen en snellere afvoer van water, stuiten steeds meer op bezwaren en beperkingen. Er worden ook steeds meer eisen gesteld aan de kwaliteit van het product en een betere bodemkwaliteit levert in het algemeen meer en kwalitatief betere producten. Een circulaire landbouw vergt steeds meer een efficiënt gebruik en beperking van verliezen van water en nutriënten. Daarnaast zijn er nieuwe ontwikkelingen op het gebied van preventie van bodemverdichting, zoals ultraflexibele lagedrukbanden, rupsen, centrale luchtdruksystemen om snel de bandspanning aan te passen, rijbanenteelt, niet-kerende-grondbewerking (NKG), bovenover-ploegen (niet meer in de open voor rijden maar boven-over ploegen), lichtere machines en robotisering. Ook buiten de landbouw wordt men er zich steeds

meer bewust dat een achteruitgang van de bodemkwaliteit grote effecten heeft op het waterbeheer, zowel wat betreft waterkwantiteit (aan- en afvoercapaciteit) als waterkwaliteit: bij hevige neerslag leidt een slechte waterinfiltratiecapaciteit niet alleen tot een snelle afvoer van veel water, maar ook van nutriënten, agrochemicaliën en grond.

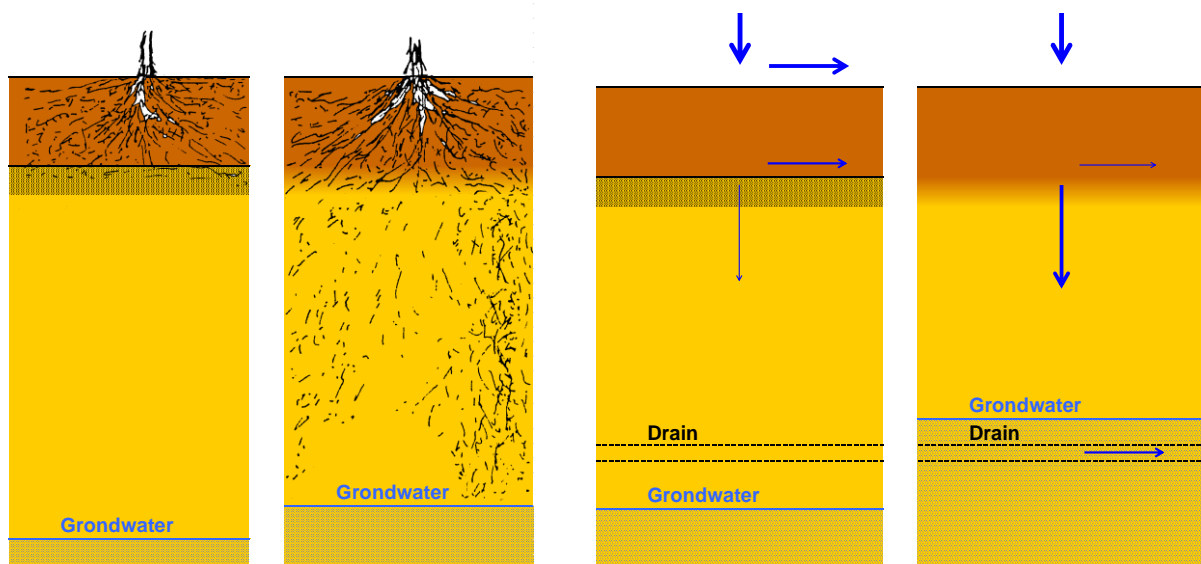
Bij het ombuigen van de trend van voortdurend toenemende verdichting van de ondergrond naar een trend met meer herstel en wellicht zelfs lagere dichtheden, moet men zich er van bewust zijn dat sommige grondsoorten zoals zand en lichte zavel zich niet of erg moeizaam herstellen. Indien deze ondergronden zo dicht zijn dat beworteling nagenoeg onmogelijk is voor de meeste cultuurgewassen, dan is een aanpak met agressief diepwortelende gewassen, wellicht losmaken en in ieder geval preventie van herverdichting noodzakelijk. Zwaardere ondergronden herstellen beter, vooral omdat deze bij uitdrogen kunnen krimpen, maar een volledig herstel kennen ook deze gronden niet. Dit wordt geïllustreerd in figuur 9, waarin een zware klei-ondergrond na 29 jaar na een zware verdichting nog steeds minder doorgaande macroporiën laat zien. De monsters zijn gestoken uit twee percelen van een veldproef in Finland dat deel uitmaakt van de in figuur 1 aangegeven serie van internationale proeven.



Figuur 9. 3-D X-ray, computed tomography (CT) scan van het macroporiënsysteem in een 8 cm hoog bodemmomonster met een diameter van 10 cm van een zware klei gestoken op een diepte van 30 tot 40 cm in Finland. Links van het referentieperceel en rechts van een perceel dat 29 jaar geleden éénmalig (dat jaar) vier maal wiel-aan-wiel is bereiden met wiellasten van 5 ton en daarna alleen bodemvriendelijk is bereiden. (Uit Schjønning et al., 2017)

Effecten van ondergrondverdichting

Twee belangrijke effecten van ondergrond worden aangegeven in de figuren 10 en 11: het beperken van de bewortelingsdiepte en het beperken van de infiltratiecapaciteit. De beperking van de bewortelingsdiepte wordt in drogere perioden veroorzaakt door een te hoge indringingsweerstand en in natte perioden door zuurstofgebrek in de dichte en slecht gestructureerde ploegzool of zelfs al in de bovengrond als water op de ploegzool stagneert. De beperkte bewortelingsdiepte kan zelfs al bij matige droogte tot een lagere opbrengst leiden en bij hevige droogte tot grote verliezen. Een voorbeeld hiervan wordt door Alblas et al., 1994 gegeven, waar snijmaïsoogstverliezen tot 38% werden geconstateerd in de situatie links in figuur 10 ten opzichte van de referentiesituatie rechts, waar de snijmaïsoopbrengst uitstekend was. Door te beregen kan veel droogteschade worden voorkomen, maar dit is duur en weinig duurzaam en bij grote droogte kunnen beregeningsverboden worden aangekondigd. De beperkte bewortelingsdiepte en de lagere snijmaïsoopbrengst heeft ook tot gevolg minder nutriënten worden opgenomen en deels uitspoelen. Ook de situatie in figuur 11 komt veel voor. De waterinfiltratiecapaciteit kan door een verdichte ondergrond zo laag zijn dat bij hevige en veel regenval het water op deze laag stagneert en de bovengrond volledig verzadigd wordt. Dit treedt ook bij anders goed tot redelijk doorlatende zandgronden op. Door de bovengrond, maar vooral over een verzadigde bovengrond kan veel neerslag horizontaal afstromen naar sloten, greppels of laagliggende delen van het perceel. Uit modelberekeningen blijkt dat de 4-uurs afvoerpiek door een hevige regenbui naar het oppervlaktewater door ondergrondverdichting ongeveer verdubbelt (Groenendijk et al., 2015). Naast water spoelen nutriënten, agrochemicaliën en grond af naar sloten en open water. De verzadigde grond leidt gemakkelijk tot structuurverlies en verslamping, waardoor de bodemeigenschappen van de bovengrond sterk verslechteren. De natschade die optreedt kan zeer groot zijn en zelfs tot het verloren gaan van de oogst leiden.



Figuur 10 (linker paar). Gemeten wortelprofiel van maïs proefveld Westerhoven (Alblas et al., 1994) bij een sterk verdichte ondergrond (links, bewortelingsdiepte ca 35 - 40 cm) en een niet verdichte ondergrond (rechts, bewortelingsdiepte ca 130 cm). (Uit Van den Akker en Hendriks, 2015).

Figuur 11 (rechter paar). Schematische voorstelling van het effect van een sterk verdichte ondergrond (links) op infiltratieproblemen en afstroming. Zonder dichte ploegzool kan een groot deel van de regen infiltreren (rechts), terwijl boven een verdichte ploegzool de bouwvoor verzadigd raakt, waarna veel water hierover afstroomt. (Uit Van den Akker en Hendriks, 2015).

Deze natschade wordt door een aantal problemen veroorzaakt:

1. De bovengrond blijft langer te nat voor bewerking en berijding, zodat het aantal werkbare dagen afneemt en de groeiperiode wordt bekort.
2. Zware regenval in het groeiseizoen kan resulteren in anaerobe situaties in de bodem en verstikking van de plantenwortels met als ultieme consequentie het verlies van de oogst.
3. Een te natte bovengrond maakt oogsten bijna onmogelijk. Oogsten op natte gronden is desastreus voor de structuur van de bodem.

Praktijkonderzoek naar het effect van ondergrondverdichting op opbrengsten is vrij beperkt en in Nederland vaak van wat oudere datum. Een belangrijk probleem is daarbij dat niet altijd duidelijk is welk deel van de opbrengstderving toegeschreven kan worden aan bovengrondverdichting en welk deel aan ondergrondverdichting. Lamers et al., (1986) vond dat op conventioneel bereiden grond de gewasopbrengst tot 10% lager was dan op onbereiden grond. Toepassing van een lagedrukberijdingssysteem met maximaal 40 kPa bandspanning in het voorjaar en maximaal 80 kPa in de rest van het jaar, leverde tot 6% opbrengstverhoging op (Vermeulen et al., 1988; Vermeulen et al., 1993). Alblas et al., (1994) concludeerden dat wiellasten van 50 kN de opbrengst van snijmais in Nederland met gemiddeld 15 % verminderden, met een maximale opbrengstvermindering van 38% in een droog jaar op de grond met een diepe grondwaterspiegel en ernstig verdichte ondergrond. In een uitgebreide studie in België is men uiteindelijk tot de conclusie gekomen dat de opbrengstderving bij ondergrondverdichting, afhankelijk van de weersomstandigheden, 10 - 35% bedraagt, waarbij in enkele extreme gevallen van droogte- en natschade en onmogelijke oogstomstandigheden dit kan oplopen tot 50 - 100%. Een vergelijking tussen 'toptelers' met 20% meer suikerbietenopbrengst en de 'gemiddelde telers' laat zien dat 'toptelers' significant betere doorlatendheid van de ondergrond hebben en grotere worteldieptes (Hanse et al., 2011). Ruwweg kan worden geconcludeerd dat ondergrondverdichting minstens 10% opbrengst kost en dit in droge of natte jaren sterk kan oplopen.

Overzicht van bestaande oplossingen

In tabel 3 is een overzicht gegeven van bestaande oplossingen zoals aangegeven door De Boer et al., 2004. Dat een goed waterbeheer als een basis wordt gezien is omdat een natte grond zeer gevoelig is voor verdichting en versmering, waarbij de structuur volledig verloren kan gaan. In de oorspronkelijke tabel van De Boer et al., (2004) stond een goed waterbeheer niet aangekruist als een curatieve methode. Een rood kruis is daarom toegevoegd, omdat een goede drooglegging ook moet worden gezien als een curatieve methode om natuurlijk herstel door krimp en zwel te realiseren en om een betere en diepere beworteling en goede omstandigheden voor het bodemleven te bevorderen. Natuurlijk herstel van met name verdichting van de ploegzool en diepere ondergrond vindt nauwelijks plaats indien deze niet minstens deels uitdrogen.

Tabel 3: Overzicht maatregelen ter beheersing van de bodemstructuur (De Boer et al., 2004). In ROOD zijn enkele toevoegingen aangebracht (zie tekst voor verdere uitleg).

| | Type maatregel | | Werkzaam op | | |
|--|----------------|----------|-------------|-----------|------------|
| | Preventief | Curatief | Bovengrond | Ploegzool | Ondergrond |
| Basis | | | | | |
| Waterbeheer op perceelsniveau: Goede ontwatering/afwatering; onderhoud/vernieuwing drainage; aandacht voor slootpeil (grasland) | X | X | X | X | X |
| Vruchtwisseling/bouwplan (strategische keuzen) | | | | | |
| meer diepwortelende gewassen | X | X | | X | X |
| ruimere vruchtwisseling met minder rooivruchten | X | X | X | X | X |
| mogelijkheden groenbemesters benutten | X | X | X | X | X |
| minder gewassen die in het najaar met zware machines geogst worden | X | | X | X | X |
| natte percelen in het voorjaar: keuze voor gewassen of rassen die later gezaaid kunnen worden | X | | X | X | X |
| natte percelen in het najaar: keuze voor gewassen of rassen die eerder geogst kunnen worden | X | | X | X | X |
| fruitboomgaarden met grasbaan / ondervrucht | X | | X | X | X |
| hanteren van een vast rijpadensysteem; aanpassen mechanisatie | X | | X | X | X |
| boomgaarden: teelt van ziekteresistente rassen of omschakeling naar biologisch (minder bewerkingen) | X | | X | X | X |
| Grondbewerking en Mestaanwending | | | | | |
| diepwoelen of diepspitten | | X | X | X | X |
| vaste tand dieper door de grond | | X | X | X | X |
| woelers aan de ploeg | X | X | X | X | X |
| gaten prikken of boren tot onder de ploegzool en deze eventueel vullen met organischestof of mest | X | X | X | X | X |
| bovenover ploegen (niet in ploegvoor rijden) | X | | | X | X |
| voldoende trekkracht voor ploeg | X | | | X | |
| pennenfrees voor niet-kerende grondbewerking | X | | | X | X |
| alleen bewerken bij voldoende droge bodem | X | | X | X | X |
| toepassen sleepslangensysteem bij mestaanwending | X | | X | X | X |
| Oogst en na oogstbewerkingen | | | | | |
| lichtere (oogst)machines | X | | X | X | X |
| lagere bandenspanning, bredere banden, meer banden | X | | X | X | X |
| vroeger oogsten indien mogelijk (bijv. vroege suikerbieten, snijmais en zetmeelaardappelen) | X | | X | X | X |
| stoppelbewerking na de oogst | X | X | X | | |
| grasland: vee alleen inscharen bij voldoende droge bodem | X | | X | | |

Wat in de bovenstaande tabel goed is voor de ondergrond is ook goed voor een ploegzool en de bovengrond. Losmaken van de ondergrond en ook de ploegzool is een korte termijn oplossing; Op de langere termijn is diepwoelen nadelig voor de grondstructuur.

De Basis van zowel voorkomen van ondergrondverdichting als natuurlijk herstel is een goede ontwatering (drainage) van het perceel. De mechanische sterkte van natte of vochtige grond is laag en is daardoor veel verdichtingsgevoeliger dan een drogere grond. Een natte grond zal ook eerder en meer versmeren bij plastische vervorming en daarbij zijn structuur totaal verliezen. Een natte, dichte en slecht gestructureerde grond kan maar moeizaam natuurlijk herstellen, vooral op wat grotere diepte. Een groot deel van de beworteling en het bodemleven overleeft een langere periode van verzadigde grond niet. In natte perioden kan de beworteling door zuurstofgebrek niet in de natte ondergrond dringen, terwijl bij enige droging de dichte grond al snel te hard wordt en de indringweerstand voor de wortels te hoog wordt. Dit beperkt de bewortelingsdiepte en de mogelijkheid van goed uitdrogen door vochtonttrekking door planten van de ondergrond, waardoor de natuurlijke herstelmogelijkheden beperkt blijven. Bij grond met meer dan ca 17% lutum (kleideeltjes) is de vorming van krimpscheuren en daarmee aggregaatvorming een sterk herstelmechanisme. Bij niet-krimpemde gronden, zoals zand en lichte zavel is beworteling en bodemleven de enige mogelijkheid voor natuurlijk herstel. Meer dan 3 tot 4% organische stof verlaagt de samendrukbaarheid van de grond en de indringweerstand en geeft de grond ook enige krimpeigenschappen. Hogere organische stofgehalten maken de grond weer gevoeliger voor plastische vervorming en versmering.

Wat betreft het onderdeel Vruchtwisseling/bouwplan is in tabel 3 in rood een ruimere vruchtwisseling met minder rooivruchten toegevoegd. Bij de oogst van rooivruchten moeten grote hoeveelheden product, bijvoorbeeld suikerbieten of peen, vaak onder nattere omstandigheden worden gerooid en afgevoerd. Een ruimer bouwplan geeft tijd en door bijvoorbeeld meer granen herstel mogelijkheden voor de grond. Bij dit onderdeel moet men ook denken aan de mogelijkheden die groenbemesters bieden. Een keuze voor diepwortelende gewassen en/of een ruimere vruchtwisseling is niet altijd economisch aantrekkelijk. Men kan dan in ieder geval proberen met een goede groenbemesterkeuze een minder bodemvriendelijk hoofdgewas te compenseren. Agressief diepwortelende gewassen staan steeds meer in de belangstelling. Een voorbeeld is sorghum, dat zelfs in zeer dichte ondergrond kan wortelen (Schittenhelm & Schroetter, 2014) en gezien wordt als aanvullend of wisselgewas van snijmaïs (Deru et al., 2018; Van Eekeren en Deru, 2014; Van Eekeren et al., 2015). Bedacht moet worden dat binnen een gewas variëteiten met een veel meer of minder agressieve beworteling mogelijk zijn. In het algemeen is gewasverbetering vooral gericht op opbrengst en kwaliteitverbetering, maar men zou ook kunnen denken aan agressief diepwortelende variëteiten, die waarschijnlijk ook veel droogteresistenter zijn.

Bij het onderdeel Grondbewerking in tabel 3 is in rood het prikken of boren van gaten tot onder de ploegzool (verdichte ondergrond direct onder bovengrond/bouwvoor) toegevoegd. Dit is net als agressief diepwortelende gewassen een methode in ontwikkeling (Colombi et al, 2017). Het boren van gaten heeft als voordeel dat grond uit de verdichte laag wordt weggehaald, zodat een zekere ontspanning in de verdichte laag optreedt en de indringweerstand voor wortels van de grond naast het gat wellicht lager wordt. Bij prikken geldt juist het omgekeerde. Het ontstane gat kan al dan niet worden opgevuld met organische stof of mest. Ten opzichte van woelen of sleuven trekken door de dichte ondergrond hebben de cilindrische gaten het voordeel dat deze grondmechanisch gezien zeer stabiel zijn. De methode zal wel duurder en arbeidsintensiever zijn, maar meer eenmalig of incidenteel dan woelen. Woelen heeft als nadeel dat bestaande poriestructuren worden verbroken en dat losgemaakte grond gemakkelijk weer verdicht en vaak na ca 3 jaar een slechtere situatie oplevert dan oorspronkelijk. Woelen zou altijd gepaard moeten gaan met een herstelplan, waarbij diepe beworteling en preventie van verdichting tot een langduriger herstel leidt. In de praktijk valt dit vaak tegen.

Bij het onderdeel Grondbewerking is in rood het toepassen van sleepslangsystemen voor mestaanwending toegevoegd. We zien de laatste jaren dat deze techniek steeds meer wordt toegepast, ook op zandgronden. De wiellasten die hierbij optreden zijn veel lager dan die van met zelfrijdende mestinjecteurs. De drijfmest wordt vaak onder vrij natte omstandigheden in het vroege voorjaar uitgereden, terwijl de werkbreedte slechts 6 meter is. Er wordt op zo'n moment onder slechte omstandigheden veel gereden met brede banden, zodat tot 50% van de grond wordt

aangedrukt. Zeker voor grasland leidt daardoor de emissiearme aanwending van mest tot veel verdichting. De toepassing van sleepslangsystemen is dan een goede oplossing.

Meer over mogelijkheden van preventie en herstel van ondergrondverdichting kan worden gevonden in Van den Akker et al., 2006.

Geconcludeerd kan worden dat er verschillende oplossingen zijn voor ondergrondverdichting. Daarbij zal altijd in de eerste plaats aan preventie moeten worden gedacht. Het probleem is echter vaak dat het effect van wiellasten wordt onderschat en dat zeker bij de oogst lang niet altijd onder voldoende droge omstandigheden kan worden gewerkt. Al met al is het altijd de uitdaging om een goed compromis te vinden waarbij de grond voldoende mogelijkheden en tijd krijgt om te herstellen van de schade die door machines wordt aangebracht.

Referenties

Akker, J.J.H. van den, G.D. Vermeulen, P.H.M. Dekker en A.P. Phillipsen, 2006. Bodemverdichting. Leidraad Bodembescherming, onderdeel 5720. Sdu, Den Haag, 51 p

Akker, J.J.H. van den, F. de Vries, G.D. Vermeulen, M.J.D. Hack-ten Broeke en T. Schouten, 2013a. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 2409, 81 blz.

Akker, J.J.H. van den; Vries, F. de; Hack-ten Broeke, M.J.D., 2013b. Risico op ondergrondverdichting in kaart : resultaten PRISMA-project 'gevoeligheid voor verdichting'. Bodem 23/1, p. 14 – 15.

Akker, J.J.H. van den, W.J.M. de Groot, M. Pleijter, D.J. Brus, M.J.D. Hack-ten Broeke, L. Schlebés, F. de Vries, 2014. Bodemverdichting kwetsbare gebieden – Opleveringsnotitie veldwerk Fase 2. Alterra-notitie JvdA2014-1, Alterra Wageningen UR, Wageningen.

Akker, J.J.H. van den, R.F.A. Hendriks, 2015. Hoe erg is ondergrondverdichting in de landbouw? Een samenvatting en conclusies uit onderzoek naar ondergrondverdichting. Bodem 3-2015, blz 42-44.

Alblas, J., Wanink, F., Van den Akker, J.J.H. & Van der Werf, H.M.G., 1994. Impact of traffic-induced compaction of sandy soils on the yield of silage maize in The Netherlands. Soil Tillage Res. 29, 157-165.

Brus, D.J. and van den Akker, J.J.H., 2018. How serious a problem is soil compaction in the Netherlands? A survey based on probability sampling. SOIL, 4, 37-45, 2018.
<https://doi.org/10.5194/soil-4-37-2018>

Colombi, T., S. Braun, T. Keller, A. Walter, 2017. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. Science of the Total Environment 574: 1283-1293

Deru, J., S. van de Goor, N. van Eekeren, A. De Vliegheer, J. Pannecouque & J. Van Waes, 2018. Sorghum als derde gewas in de melkveehouderij. Louis Bolk Instituut i.s.m. ILVO (Instituut voor Landbouw en Visserijonderzoek), 19 pp.

De Boer, H.C., 2004. Advies Goede Landbouw- en Milieuconditie Landbouwgronden (GLMC). Praktijkonderzoek van de Animal Science Group (ASG). Rapport Lelystad: 38 pp.

Eekeren, N.J.M. van & J.G.C. Deru. 2014. Sorghum droogtetolerant alternatief voor snijmais. V-focus, februari 2014: 16-17.

Eekeren, N.J.M. van, J.G.C. Deru, S. Gerdes. 2015. Bufferboeren: Productieve maatregelen voor meer droogtetolerantie. 2015-028 LbD. Louis Bolk Instituut, Driebergen. 40 p.

Ehlers, W., Schmidke, K. & Rauber, R., 2003. Changes in the state of compaction and structural performance of loess-derived arable soils in the south of Lower Saxony (in German). Landnutzung und Landentwicklung 44, 9-18.

Elsen, F., V. Beckers, J. Diels, J. Van Orshoven, S. Wauters, M. Huybrechts, (nog niet gepubliceerd). Praktijkonderzoek naar de toepassing van preventieve en remediërende maatregelen tegen bodemaantasting door bodemverdichting. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Overheid. Dep. Leefmilieu, Natuur en Energie, Afd. Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen, door de Bodemkundige Dienst van België, het Departement Aard- en Omgevingswetenschappen (KU Leuven) en Thomas More (KU Leuven Associatie), 314 pp.

- Groenendijk, Piet, Peter Schipper, Rob Hendriks, Jan van den Akker en Marius Heinen, 2017. Effecten van verbetering bodemkwaliteit op waterhuishouding en waterkwaliteit. Deelstudies Goede Grond voor een duurzaam watersysteem. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2811. 128 blz. <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/418283>
- Håkansson, I. (Ed.), 1994. Subsoil compaction by high axle load traffic. Special Issue Soil Tillage Res. 29, 105-306.
- Håkansson, I. and Reeder, R.C. (1994) Subsoil compaction by vehicles with high axle load - extent, persistence and crop response. Soil and Tillage Research 29, 277-304.
- Håkansson, I., Voorhees, W.B., Elonen, P., Raghavan, G.S.V., Van Wijk, A.L.M., Rasmussen, K. Riley, H., 1987. Effect of high-axle load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. Soil Tillage Res. 10, 259-268.
- Hanse, B., G.D. Vermeulen, F.G.J. Tijink, H.-J. Koch, B. Märlander, 2011. Analysis of soil characteristics, soil management and sugar yield on top and averagely managed farms growing sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in the Netherlands. Soil & Tillage Research 117, 61-68
- Kooistra, M.J. and Boersma, O.H., 1994. Subsoil compaction in Dutch marine sandy loams: loosening practices and effects. Soil Tillage Res. 29: 237-247.
- Schjønning, P., van den Akker, J.J.H., Keller, T., Greve, M.H., Lamandé, M., Simojoki, A., Stettler, M., Arvidsson, J., Breuning-Madsen, H., 2015. Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction—A European Perspective. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*, Elsevier, pp. 183-237. ISBN: 9780128030523, <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.001>
- S. Schittenhelm, S. & S. Schroetter, 2014. Comparison of Drought Tolerance of Maize, Sweet Sorghum and Sorghum-Sudangrass Hybrids. *Journal of Agronomy and Crop Science*. Blackwell Verlag GmbH, 200: 46-53
- Van den Akker, J.J.H. 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. Soil & Tillage Research 79, 113-127.
- Van den Akker, J.J.H. and Schjønning, P., 2004. Subsoil compaction and ways to prevent it. Chapter 10 in: Schjønning, P., Elmholt, S. and Christensen, B.T. (eds.). *Managing Soil Quality: Challenges in modern agriculture*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, pp 163-184.
- Van den Akker, J.J.H., Arvidsson, J. & Horn, R., 2003. Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. Soil and Tillage Res. 73: 1-8.
- Van den Akker, J.J.H., Hoogland, T., 2011. Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands. Soil & Tillage Res. 114, pp 146-154. doi:10.1016/j.still.2011.04.002
- Vermeulen, G.D., Verwijs, B.R., van den Akker, J.J.H. 2013. Vergelijking van de bodembelasting bij agrarisch veldwerk in 1980 en 2010. Wageningen, Plant Research International, Rapport 501, 38 pp
- Vermeulen, G.D., 2005. Ervaringen met een rijpadensysteem voor biologische teelt op grotere schaal. Studiedag 2005, Grenzen aan schaalvergroting. Nederlandse Vereniging voor Techniek in de Landbouw.
- Vermeulen, G.D., W.B.M. Arts en J.J. Klooster, 1988. Perspective of reducing soil compaction by using a low ground pressure farming system: selection of wheel equipment. Proc. 11th Conf. Int. Soil Tillage Res. Organ. (ISTRO), Edinburgh, U.K., Vol.1, pp. 329-334.

Vermeulen, G.D., W.B.M. Arts, B.R. Verwijs en J. van Maanen, 1993. Berijdingsmogelijkheden veengrasland. II: Afstemming van bandspanning en draagkracht. In: Snoek, H. (ed.), Proc. Theme day grasland en berijding (Grassland and Traffic), 17 June 1993. Res. Sta. Dairy Farming (PR), Lelystad, Netherlands, pp. 27-33.

Vermeulen, G.D. and Perdok, U.D., 1994. Chapter 19. Benefits of Low Ground Pressure Tyre Equipment. In: Soane, B.D. and Ouwerkerk, C. van (editors) Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering. Elsevier, Amsterdam: 447-478.

Vries, F de., 2004. Samengesteld door Folkert de Vries (Alterra) op basis van de Bodemkaart van Nederland (1:50000) en de Landelijke Grondgebruikskaat

Voorhees, W.B., 2000. Long term effects of subsoil compaction on yield of maize. In: Horn, R., Van den Akker, J.J.H., Arvidsson, J. (Eds.), Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences. Advances in GeoEcology 32. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, pp. 331-338

Wanink, F., Alblas, J., Werf, H.M.G. van der, Akker, J.J.H. van den, 1990. Snijmaïsobbrengst beïnvloed door berijding. Landbouwmecanisatie, nr. 4, april 1990, pp. 28-29.

Weissbach, M., 2002. Landtechnische Untersuchungen zur Wirkung bodenschonender Fahrwerke an Scheppern und Arbeitsmaschinen mit verschiedenen Radlasten. Habilitationsschrift, Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 210 pp.