



Handreiking Onderzoek bodemverdichting landelijk gebied

Versie 1.0, 13 december 2018

SIKB-handreiking 8151



Colofon

Status

Deze handreiking (versie 1.0) is op 13 december 2018 vastgesteld door het Centraal College van Deskundigen (CCvD) / Accreditatiecollege Bodembeheer, ondergebracht bij de Stichting Infrastructuur Kwaliteitsborging Bodembeheer (SIKB) te Gouda.

Eigendomsrecht

Deze handreiking is opgesteld in opdracht van en uitgegeven door de Stichting Infrastructuur Kwaliteitsborging Bodembeheer (SIKB). Het Centraal College van Deskundigen (CCvD) / Accreditatiecollege Bodembeheer, ondergebracht bij SIKB, beheert deze handreiking inhoudelijk. De actuele versie van deze handreiking staat op de website van SIKB (www.sikb.nl) en is op elektronische wijze tegen ongewenste aanpassingen beschermd. Het is niet toegestaan om wijzigingen aan te brengen in de originele en door het CCvD / Accreditatiecollege Bodembeheer goedgekeurde en vastgestelde teksten met het doel hieraan rechten te (kunnen) ontfemen.

Vrijwaring

SIKB is behoudens in geval van opzet of grove schuld niet aansprakelijk voor schade die bij de gebruiker of derden ontstaat door het toepassen van dit document.

© Copyright 2018 SIKB

Overname van tekstdelen en beeld is toegestaan met bronvermelding. Alle rechten berusten bij SIKB.

Bestelwijze

Dit document is in digitale vorm kosteloos te verkrijgen bij SIKB. Een ingebonden versie kunt u bestellen tegen kosten, op te vragen bij SIKB.

Bronnen beeldmateriaal

SIKB.

Updateservice

Door het CCvD / Accreditatiecollege Bodembeheer vastgestelde mutaties in dit document zijn te verkrijgen bij SIKB. Via www.sikb.nl kunt u zich aanmelden voor automatische toezending van mutaties. U kunt u via www.sikb.nl ook opgeven voor de gratis digitale nieuwsbrief.

Helpdesk/gebruiksaanwijzing

Voor vragen over inhoud en toepassing van dit document kunt u terecht bij SIKB. Voor geschillen zie de klachten- en geschillenregeling via www.SIKB.nl.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Doel en doelgroep van de handreiking	4
1.2	Aanleiding	4
1.3	Status en reikwijdte van de handreiking	5
1.4	Plaats ten opzichte van andere documenten	6
1.5	Meerwaarde handreiking voor huidige praktijk	7
1.6	Verantwoordelijkheden van de opdrachtgever	8
1.7	Verklaring van gebruikte begrippen	8
1.8	Leeswijzer	9
2	Procesbeschrijving onderzoek bodemverdichting	10
3	Bepalen kaders onderzoek en onderzoeksstrategie	12
3.1	Inleiding	12
3.2	Formuleren aanleiding en doel van het onderzoek	12
3.3	Benodigde informatie voor het onderzoek	13
3.3.1	Eisen en wensen van betrokken actoren	13
3.3.2	Conceptual Site Model (CSM) bodemverdichting	14
3.3.3	Overige gebiedskenmerken	19
3.3.4	Eisen aan het onderzoeksresultaat	19
3.3.5	Planningsaspecten	20
3.4	Formuleren onderzoeksstrategie	20
3.5	Opstellen onderzoeksvraag	21
4	Toetsing haalbaarheid onderzoekwensen aan beschikbare technieken	22
4.1	Inleiding	22
4.2	Toepasbare technieken	22
4.2.1	Indirecte meting van bodemdichtheid	23
4.2.2	Directe meting van bodemverdichting	25
4.3	Mogelijke onderzoeksaanpakken	26
4.4	Pilot	27
5	Opstellen uitvraag	28
5.1	Inleiding	28
5.2	Aan te leveren informatie bij de uitvraag	28
5.3	Eisen aan de aan te vragen offertes	29
5.4	Bewijslast indiener offerte	29
5.5	Eisen aan de inhoud van het onderzoeksrapport	30
6	Besluitvorming op basis van onderzoeksresultaten	31
Bijlage 1.	Technieksheets gebiedsdekkende elektrische meettechnieken: toepasbaarheid voor onderzoek bodemverdichting	

1 Inleiding

1.1 Doel en doelgroep van de handreiking

Deze handreiking is opgesteld om overheden in de rol van gebiedsbeheerder en opdrachtgever te ondersteunen bij het efficiënt inrichten van gebiedsdekkend onderzoek naar het optreden en de mate van bodemverdichting in agrarisch gebied. Het gaat daarbij om onderzoek op gebieds- en perceelschaal, met gebruik van vlakdekkende onderzoeksmethoden. Detailonderzoek op specifieke deelgebieden valt buiten de scope.

De handreiking ondersteunt de opdrachtgever van het onderzoek bij het formuleren van de vraag, het formuleren van de gewenste onderzoeksstrategie, de (pre)selectie van geschikte (combinaties van) onderzoekstechnieken, het doen van de uitvraag, het beoordelen van offertes en het beoordelen en interpreteren van de resultaten van het onderzoek.

Doelgroep van de handreiking zijn opdrachtgevers die actief zijn met:

- beleidsmatige taken op gebied van economische ontwikkeling en voedselproductie;
- beleidsmatige en uitvoerende taken op gebied van waterbeheer (kwalitatief en kwantitatief);
- landbouw (belangenorganisaties en collectieven van agrariërs).

Ander gebruik van de handreiking

Ook andere partijen kunnen gebruikmaken van deze handreiking, maar deze is hier niet op toegeschreven. Daardoor kunnen zij aspecten missen die specifiek voor hun rol of taak van belang zijn.

1.2 Aanleiding

De aanleiding voor het opstellen van deze handreiking voor het meten en monitoren van verdichting in agrarisch gebied is de vraag welke rol verdichting speelt in het waterbeheer. Verdichting is het comprimeren of samenvakken van de bodem, als gevolg van menselijke beïnvloeding of door natuurlijke processen.

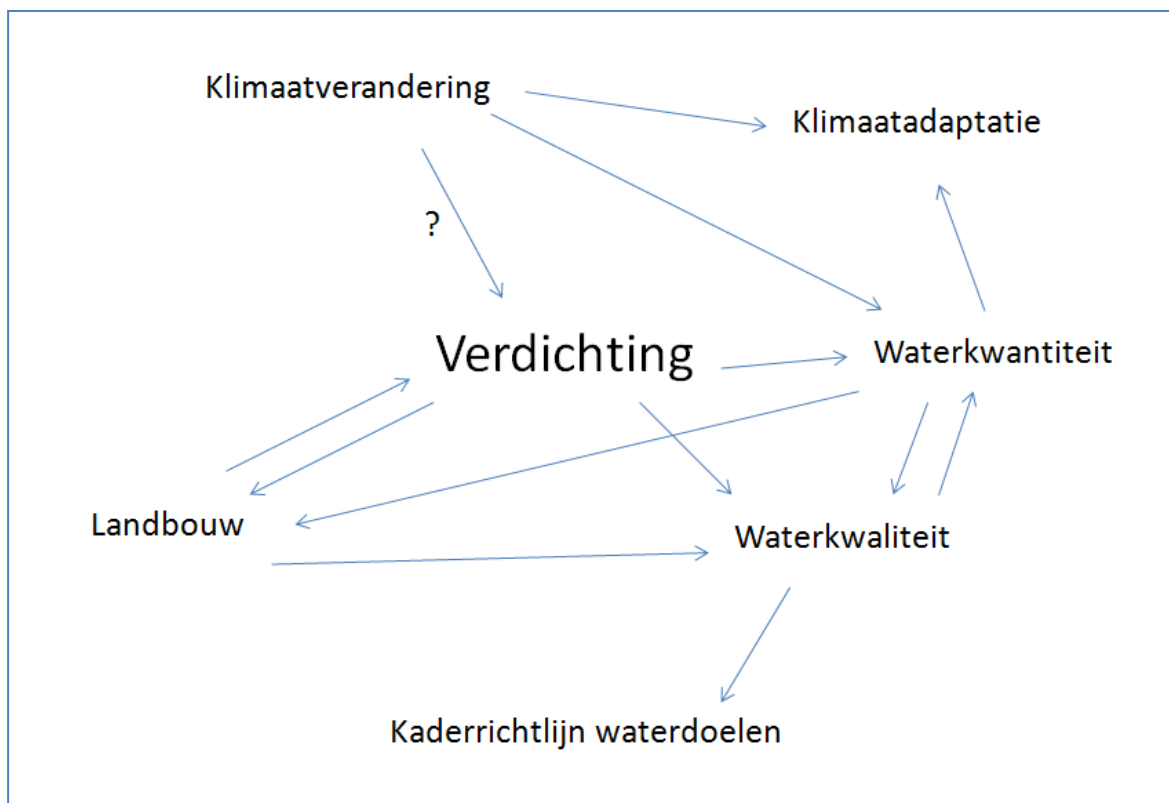
Verdichting is nadelig voor de bodemstructuur en als gevolg daarvan voor in en op de bodem levende planten en dieren, begaanbaarheid van percelen en de waterhuishouding. Door verdichting kan regenwater slechter wegzakken in de bodem. Dit veroorzaakt wateroverlast op verdichte percelen en versnelde afvoer (run-off) naar watergangen. Voor de waterbeheerder betekent dit verhoogde piekafvoeren en hogere concentraties nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen in het oppervlaktewater. Voor de agrariër betekent dit verminderde gewasopbrengst en verslechterde begaanbaarheid van verdichte percelen.

Bodemverdichting is een aantasting van de fysische kwaliteit van de bodem. Het is in de Europese bodemstrategie genoemd als één van Europa's belangrijkste aantastingen van de bodem.¹

Omdat de mate van en de ontwikkeling in bodemverdichting in het agrarisch gebied grotendeels onbekend is, is ook onbekend in welke mate de bodemverdichting bovengenoemde effecten veroorzaakt. Mede gelet op de verwachte extremere weersomstandigheden als gevolg van klimaatverandering – waaronder een toename in het aantal zware regenbuien – is het belangrijk alle factoren die met de waterhuishouding te maken hebben goed in beeld te hebben. De (mogelijke) rol van verdichting in dit speelveld is geïllustreerd in onderstaande figuur.

Het is voor agrariërs en waterbeheerders van belang zicht te krijgen op bodemverdichting, zowel op gebiedsniveau als op perceelniveau. Deze handreiking biedt handvatten voor het (laten) uitvoeren van onderzoek dat hiervoor nodig is.

¹ Commissie van de Europese Gemeenschappen, 2006. *Thematische strategie voor bodembescherming*. Commissie van de Europese Gemeenschappen, COM(2006) 231, Brussel.



Figuur 1.1 Schets van plek verdichting in problematiek klimaat /water/landbouw.

1.3 Status en reikwijdte van de handreiking

Status

De handreiking is bedoeld voor overheden in de rol van gebiedsbeheerder en opdrachtgever. Er zijn geen wettelijke regelingen voor het voorkomen of herstellen van bodemverdichting in agrarisch gebied.² Wel kunnen partijen onderling afspraken hebben over verdichting. Deze zouden dan als aanleiding voor onderzoek kunnen dienen.

De uitvoering van het onderzoek is niet uitgewerkt op het niveau van uitvoeringsvoorschriften (protocol voor opdrachtnemers). De handreiking biedt wel handvatten om onderzoeksplannen te beoordelen, maar schrijft geen technieken of werkwijzen voor.

Reikwijdte

De handreiking is gericht op het onderzoek naar verdichting van de bodem in agrarisch gebied als gevolg van menselijk handelen. Denk hierbij niet alleen aan het berijden van agrarische percelen met zware machines, maar ook aan bijvoorbeeld zwaar grondverzet voor aanleg van bekabeling, opslag en bouw en sloop. Verdichting van de bodem kan ook optreden in stedelijk gebied en in natuurgebieden. Daarnaast kan bodemverdichting ook door natuurlijke processen optreden. Deze laatste processen vallen buiten de scope van deze handreiking.

De afbakening van agrarisch gebied is gemaakt omdat onderzoek naar verdichting in stedelijk gebied, natuurgebied en onderzoek door verdichting door natuurlijke processen vraagt om een andere onderzoeksstrategie en andere inzet van onderzoekstechnieken en/of interpretatie.

² Er zijn wel regelingen die toezien op maximale aslast op wegen of verdichting van bodem bij civiele werken. Deze vallen buiten de scope van de voorliggende handreiking.

Naast verdichting van bodems van agrarische percelen kan verdichting ook spelen in natuurgebieden, stedelijk gebied (met wateroverlast als gevolg door afname van waterbufferend vermogen van de ondergrond), ter plaatse van infrastructurele werken (waar verdichting van een wegtalud een doel is, in tegenstelling tot landbouwgrond waar het een ongewenst effect is) of rondom infrastructurele werken (door zwaar materieel). Een aantal aspecten van onderzoek naar verdichting op deze andere terreinen kan wezenlijk verschillen van verdichting in landbouwgronden. Denk aan de aanleiding voor het onderzoek, wettelijke of contractuele aspecten of het handelingsperspectief.

De denklijn van de handreiking is bruikbaar voor gebieden met andere functies en andere oorzaken van verdichting. Maar omdat bij andere gebruiksfuncties andere terreineigenschappen kennen (aanwezigheid van bijvoorbeeld bomen, gebouwen of verharding maken bepaalde screeningstechnieken plaatselijk onmogelijk) en de oorzaak van verdichting anders is (vaak een meer plaatselijke heterogene belasting) zijn de aanwijzingen en technieken uit deze handreiking niet één op één bruikbaar voor gebieden met andere functies dan agrarisch gebied.

Naast verdichting van de bodem kunnen andere processen aan de orde zijn die leiden tot verandering van de bodemstructuur. Denk hierbij aan verslemping, korstvorming of klink. Al deze processen kunnen individueel of in allerlei gradaties gelijktijdig optreden. Voor het onderzoek naar bodemverdichting is van belang dat de er een grote overlap is in de wijze waarop zowel bodemverdichting als deze andere processen tot uiting komen. Bij de interpretatie van onderzoeksresultaten speelt deze overlap een belangrijke rol.

Bodemverdichting is op dit moment een belangrijk punt is op de maatschappelijke agenda, waarbij het handelingsperspectief duidelijk is gelinkt aan de wijze van terreingebruik. Daarom richt deze handreiking zich primair op onderzoek naar bodemverdichting.

De voorliggende handreiking is toepasbaar voor onderzoek van bodemverdichting in agrarisch gebied op verschillend schaalniveau: gebiedsniveau (welk percentage van het gebied is in welke mate verdicht) en perceelsniveau (is er een patroon binnen het perceel waar de verdichting erger en minder erg is). De handreiking biedt handvatten voor éénmalige opname en mogelijkheden om tijdsgebonden aspecten van verdichting te meten (monitoring).

Doel van deze Handreiking is in eerste instantie het verkrijgen van inzicht in de mate van bodemverdichting in een gebied. Besluitvorming (door de boer en/of door een gebiedsbeherende overheid) over preventief beleid, de wijze van implementatie daarvan en eventuele monitoring van het beleid, behoort niet tot de scope van dit document.

Besluitvorming kan ook monitoring van de bodemverdichting of effectiviteit van (preventieve) maatregelen inhouden. Deze handreiking gaat niet in detail in op een dergelijke monitoring maar biedt wel handvatten daarvoor. Om hier concrete voorstellen voor te doen, is eerst meer ervaring met onderzoek grootschalig onderzoek van bodemverdichting vereist.

1.4 Plaats ten opzichte van andere documenten

Er zijn geen protocollen die betrekking hebben op het meten van bodemverdichting.

In deze handreiking wordt gebruikgemaakt van het begrip 'Conceptual Site Model' (CSM). Hierbij wordt de beschrijving van CSM uit de NTA5755 'Strategie voor het uitvoeren van nader onderzoek – onderzoek naar de aard en omvang van bodemverontreiniging' aangehouden.



Gevolgen van bodemverdichting

1.5 Meerwaarde handreiking voor huidige praktijk

Uitgangspunt voor de onderzoeksstrategie die in de handreiking wordt beschreven is gebiedsdekkende meting van gidsparemeters met elektronische technieken en ijking/kalibratie daarvan met directe puntmetingen. De meerwaarde van deze onderzoeksstrategie ligt in minimaliseren van onderzoekskosten en het efficiënt vlakdekkend in beeld brengen van de verdichting in een relatief groot gebied. Het alternatief van een onderzoekstrategie met alleen directe metingen, zonder gebruik te maken van elektronische technieken, leidt tot hoge onderzoekskosten, lange uitvoeringsperiode en onzekerheid van interpolatie van metingen tussen de puntmetingen in.

Ondanks dat het fenomeen bodemverdichting al lang bekend is, is de methode voor het onderzoek naar bodemverdichting nog lang niet uitgekristalliseerd. De huidige praktijk is dat bodemverdichting voornamelijk door directe meting van de verdichting zelf wordt gemeten. Deze puntmetingen zijn relatief kostbaar en complex (zie ook § 4.2, onderdeel 'directe meting van bodemverdichting'). Een dergelijk aanpak voor het uitkarteren of monitoren van verdichting in grotere gebieden is niet werkbaar.

Alternatieve technieken, waarmee bodemverdichting indirect en gebiedsdekkend met behulp van gidsparemeters in kaart kan worden gebracht, worden nog nauwelijks toegepast. Dit komt omdat hierover nog veel vragen zijn. Toch bieden deze alternatieve meettechnieken kansen om het onderzoek naar verdichting op gebiedsniveau kosteneffectief uit te voeren. Deze handreiking biedt handvatten om een dergelijk onderzoek op te zetten.

Deze handvatten bestaan uit:

- generieke aspecten van het opzetten van onderzoek naar verdichting;
- informatie over de laatste stand van zaken op techniekniveau.

Dit laatste omvat het geven van een actueel overzicht van gebiedsdekkende indirecte technieken voor verschillend schaalniveau, combinaties daarvan en aandachtspunten voor interpretatie van metingen.

De informatie in deze handreiking biedt een basis om per specifieke situatie een op maat gemaakt onderzoeksplan op te stellen. Het opstellen van het onderzoeksplan zelf valt buiten de scope van deze handreiking.

1.6 Verantwoordelijkheden van de opdrachtgever

Richting gebruikers van het gebied

De opdrachtgever is meestal de eigenaar of de beheerder van het gebied waarop het uit te voeren onderzoek betrekking heeft. Het onderzoek moet zo worden uitgevoerd, dat de belangen van de gebruikers gewaarborgd zijn. Het kennen van deze belangen en het kennen van de invloeden die deze belangen kunnen benadelen, bepalen mede de focus van het uit te voeren onderzoek.

Richting opdrachtnemers

Om het onderzoek effectief en efficiënt uit te laten voeren, moet de opdrachtgever duidelijk maken wat zijn wensen zijn wat betreft het uit te voeren onderzoek. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de mate van betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van het uit te voeren onderzoek. Daarmee kan een techniekaanbieder een geschikt onderzoeksplan uitwerken.

1.7 Verklaring van gebruikte begrippen

Begrip	Omschrijving
Beslisriteria	Praktische uitwerking van het toetsingskader in het onderzoeks- of monitoringsplan, toegespitst op de toe te passen meettechniek(en) en het meetprotocol.
Betrouwbaarheid	De mate waarin de onderzoeksresultaten correct en representatief zijn voor het gebied waarop de resultaten betrekking hebben. De betrouwbaarheid wordt bepaald door de nauwkeurigheid van de metingen, de verificatie van het meetresultaat, de meetdichtheid en de heterogeniteit van de te meten parameter binnen het onderzoeksgebied.
Bodemverdichting	Aantasting van de bodemstructuur en afname van poriënvolume en doorlatendheid door belasting.
Conceptual Site Model (CSM)	Denkmodel dat een beschrijving en/of visualisatie van het te onderzoeken fenomeen geeft, in relatie tot het bodemsysteem en het bodemgebruik. Het conceptuele model kan dienen als raamwerk voor het opzetten van onderzoeksactiviteiten en het identificeren van kennisleemtes.
Elektronische bodemonderzoekstechnieken	Onderzoekstechniek waarmee relatief snel een (gids)parameter van de ondergrond kan worden gemeten. Deze metingen zijn relatief snel achter elkaar op meerdere plaatsen in een gebied te meten. Hierdoor kan relatief snel een gebied in kaart worden gebracht.
Gidsparameter	Een bodemeigenschap, niet zijnde verdichting zelf, die kan wijzen op verdichting van de bodem. Met directe verificatiemetingen van verdichting zelf kan deze parameter worden gekalibreerd en zodoende worden gebruikt om op andere plaatsen de bodemverdichting af te leiden.
Heterogeniteit	De ruimtelijke variatie van een (gids)parameter in een onderzoeksgebied.
Meetdichtheid	Aantal meetpunten per ruimtelijke eenheid (bijv. aantal raaien per meter slootdemping).
Klink	Het dalen van de bodem door ontwatering en/of oxidatie.

Begrip	Omschrijving
Korstvorming	Vervloeiing van fijne kleideeltjes waarbij deze de poriën tussen de grovere zanddeeltjes opvullen. Na opdrogen ontstaan korsten.
Meetnauwkeurigheid	De mate van overeenstemming van een gemeten waarde met zijn daadwerkelijke (ware) waarde. Hoe groter de nauwkeurigheid hoe kleiner de meetfout. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen juistheid en precisie. Als een resultaat zowel juist als precies is, wordt dit geldig of valide genoemd.
Monitoringsplan	Onderzoeksplan met hieraan toegevoegd een meetfrequentie.
Onderzoeksplan	Het geheel aan onderzoekstechnieken, plaats, locatie en aard van inzet (inclusief de wijze waarop ze elkaar aanvullen) en wijze van interpreteren om antwoord te kunnen geven op een onderzoeksvraag.
Onderzoeksstrategie	Strategische keuzes m.b.t. het uit te voeren onderzoek, op basis van de verwachte <i>heterogeniteit</i> van het te meten kenmerk (en, indien van toepassing, variatie in de tijd), de gewenste <i>betrouwbaarheid</i> en eventuele andere randvoorwaarden. Deze keuzes hebben invloed op het <i>onderzoeksplan</i> .
Onderzoeksvraag	De inhoudelijke vraag die met het onderzoek beantwoord moet worden. De onderzoeksvraag volgt uit de aanleiding en het doel van het onderzoek in combinatie met het CSM.
pF	Waterretentiecurve van de bodem
Toetsingskader	Kader om de onderzoeksresultaten te toetsen en er conclusies aan te verbinden zodat op basis daarvan een beslissing ten aanzien van het vervolg (zoals wijziging van beleid of uitvoeringsacties) genomen kan worden.
Verificatiemeting	Meting met andere techniek om meetresultaat te kunnen toetsen op waarde of, in het geval van een gidsparameter, te kunnen relateren aan een andere eenheid.
Verslemping	Het wegvallen of verminderen van de binding tussen bodemdeeltjes (bodemaggregaten) bijv. door inslag van regendruppels waardoor schifting van deze bodemdeeltjes ontstaat. Fijnere lutum- en silt-deeltjes verstopen de poriën in de bodem, waardoor een papperige laag ontstaat die na drogen een slempkorst vormt (zie ook 'korstvorming').

1.8 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 schetst het proces rond het onderzoek van bodemverdichting, van aanleiding en kader tot acties die voortvloeien uit de onderzoeksresultaten. Hoofdstuk 3 geeft opdrachtgevers aanwijzingen voor het verzamelen van relevante informatie en het bepalen van een onderzoeksstrategie. Om de haalbaarheid van deze onderzoeksstrategie te kunnen toetsen, geeft hoofdstuk 4 een toelichting op de beschikbare meettechnieken. Op basis daarvan kan de opdrachtgever de onderzoeksstrategie zo nodig bijstellen. Hoofdstuk 5 geeft aanwijzingen voor het opstellen van een uitvraag (of offerte-aanvraag) voor de daadwerkelijke uitvoering van het onderzoek naar verdichting, inclusief te stellen eisen aan offertes en onderzoeksresultaten (hoofdstuk 5). Hoofdstuk 6 gaat in op de besluitvorming naar aanleiding van de onderzoeksresultaten.

2 Procesbeschrijving onderzoek bodemverdichting

Dit hoofdstuk beschrijft het proces van het onderzoek naar bodemverdichting, van de aanleiding voor het onderzoek tot het nemen van maatregelen op basis van de uitkomsten van het onderzoek.

Figuur 2.1 geeft de procesbeschrijving schematisch weer, en geeft aan op welke plek in deze handreiking de aanwijzingen voor de uitvoering van de diverse processtappen zijn te vinden.

Het processchema (figuur 2.1) beschrijft de verschillende processtappen die de opdrachtgever doorloopt en de rol van de verschillende actoren daarin. De eerste twee processtappen betreffen de aanleiding / het grotere verhaal: het gebiedsbeheer en wie daar op welke manier bij betrokken is. In dit geval zijn dit de waterschappen en de provincies. Anderzijds zijn er gebruikers van de landbouwpercelen die invloed hebben op én overlast ondervinden van de verdichting. Deze eerste twee stappen zijn niet uitgewerkt in deze handreiking, maar hebben wel invloed op de invulling van het onderzoek. Zij worden meegenomen als input in de eerste processtap die wél in deze handreiking is opgenomen, namelijk het bepalen van de onderzoeksstrategie op basis van alle relevante informatie (processtap 3.1). Op basis van het onderzoeksdoel, de organisatorische en de technische randvoorwaarden wordt een concept onderzoeksstrategie geformuleerd.

Voordat deze onderzoeksstrategie wordt opgenomen in de uitvraag, kan de opdrachtgever in processtap 3.2 eerst toetsen in hoeverre zijn wensen realistisch en welke technieken beschikbaar zijn om zijn vraag te beantwoorden. Er wordt beschreven welke technieken in aanmerking komen voor het onderzoeken van bodemverdichting, en wat de eigenschappen en voor- en nadelen zijn van de verschillende technieken.

Het kan blijken dat de gekozen onderzoeksstrategie niet realistisch is en dat stap 3.1 (deels) opnieuw doorlopen moet worden. Het formuleren van de onderzoeksstrategie kan hiermee een iteratief proces zijn (d.w.z. aangepast aan voortschrijdend inzicht op basis van de uitkomsten van voorgaande stappen). Na het (iteratief) doorlopen van stap 3 heeft de opdrachtgever een realistische onderzoeksstrategie waarmee hij een uitvraag voor het onderzoek kan doen.

De informatie die is gebruikt bij het doorlopen van de processtappen 3.1 en 3.2 vormt de basis voor het opstellen van de uitvraag voor het onderzoek (processtap 4). De uitvraag bestaat uit twee delen:

- het opstellen van een onderzoeks- of monitoringsplan;
- het uitvoeren van het onderzoeksplan, inclusief interpretatie en rapportage.


De handreiking geeft de opdrachtgever handvatten voor het doen van de uitvraag voor beide onderdelen.

Het goed doorlopen van de stappen 1 t/m 4 stelt de opdrachtgever in staat om de uitvoering van het onderzoek (processtap 5) adequaat aan te sturen. De handreiking bevat daarom verder geen specifieke aanwijzingen voor processtap 5.

Na de uitvoering van het onderzoek vindt besluitvorming plaats en zet de opdrachtgever indien nodig – en mogelijk in samenwerking met andere betrokken partijen – maatregelen in gang (stap 6 en 7 in het processchema). Deze stappen zijn (net als stap 1 en 2) van groot belang voor de inrichting van het onderzoek. Daarom zijn de beoogde besluitvorming en mogelijke vervolgacties betrokken in de aanwijzingen voor processtap 3.1 in hoofdstuk 3 van deze handreiking. Ook hoofdstuk 6 geeft toelichting op de besluitvorming die kan volgen na onderzoek naar bodemverdichting.

Figuur 2.1 Processchema onderzoek naar bodemverdichting

	Plaats in deze handreiking	Rol gebiedsbeheerder/opdrachtgever	Rol onderzoeksbureau	Rol overheid (waterschap, provincie, rijk)	Rol agrariërs	Rol kennisinstellingen en/of landbouwkoepels
1. Beheer van gebied (met mogelijke bodemverdichting)		Uitvoeren beheer, nakomen afspraken met overige actoren		Normstellend kwantiteit en kwaliteit water	Belang bij en uitvoering geven aan goed agrarisch bodembeheer	
2. Vraag m.b.t. de toestand van de bodem, voortkomend uit knelpunten, opgaven en/of verplichtingen	Hoofdstuk 3	Invulling geven aan de wens inzicht te hebben in bodemverdichting			- toestemming geven voor onderzoek - belanghebbende bij onderzoek	Zijn geïnteresseerd in gegevens over bodemverdichting, oorzaken, effecten en handelingsperspectief
3.1. Opstellen onderzoeksstrategie stap 1: O.b.v. alle relevante informatie wordt de (voorlopige) onderzoeksstrategie bepaald	Hoofdstuk 3	Bepalen voorlopige onderzoeksstrategie, evt. afstemmen met overige actoren	Evt. meedenken in onderzoeksstrategie	Evt. meedenken in onderzoeksstrategie	Evt. meedenken in onderzoeksstrategie	Evt. meedenken in onderzoeksstrategie
3.2. Opstellen onderzoeksstrategie stap 2: 'Reality check' onderzoeksstrategie aan de hand van toepasbare technieken	Hoofdstuk 4	Toetsen of gekozen onderzoeksstrategie haalbaar is bij gegeven randvoorwaarden en uitgangspunten	Evt. meedenken			
4. Uitbesteden bodemonderzoek	Hoofdstuk 5	Uit (laten) voeren: - opstellen uitvraag - opstellen onderzoeks-/monitoringsplan - opdrachtverlening	Opstellen offerte (evt. inclusief onderzoeksplan)	Evt. meedenken in onderzoeksplan/monitoringsplan	Evt. meedenken in onderzoeksplan/monitoringsplan	Evt. meedenken in onderzoeksplan/monitoringsplan
5. Uitvoeren bodemonderzoek		Uit (laten) voeren: - begeleiding onderzoek - interpretatie resultaten Beoordelen rapportage	Uitvoeren: - uitvoeren onderzoek - interpretatie/rapportage		- Toestemming geven voor uitvoering/betreding - Evt. meewerken in onderzoek en/of meedenken bij interpretatie	Evt. meewerken in onderzoek en/of meedenken bij interpretatie
6. Besluitvorming n.a.v. bodemonderzoek	Hoofdstuk 6	Nemen beslissing voor vervolgmaatregelen (bodembeheer, waterbeheer, beleid) op basis van onderzoeksresultaten	Evt. advies over vervolgmaatregelen in rapportage	Evt. beoordelen rapportage	Evt. beoordelen rapportage	Evt. beoordelen rapportage
7. Maatregelen n.a.v. bodemonderzoek		(Laten) uitvoeren acties die volgen uit beslissing		Beoordelen effect op waterbeheer (Stimulering)beleid	Aanpassingen in bodembeheer	Kennisopbouw over effect bodembeheer op verdichting en waterbeheer

 = onderdeel van deze richtlijn

3 Bepalen kaders onderzoek en onderzoeksstrategie

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk biedt handvatten voor het verzamelen van alle relevante informatie voor het onderzoek en het op basis daarvan bepalen van de onderzoeksstrategie. Zowel de verzamelde informatie als de gekozen onderzoeksstrategie vormen een onderdeel van de op te stellen uitvraag (hoofdstuk 5). Dit hoofdstuk geeft aanwijzingen aan opdrachtgevers voor het doorlopen van de volgende stappen:

- formuleren aanleiding en doel van het onderzoek (§ 3.2);
- inwinnen van informatie (§ 3.3);
- formuleren onderzoeksstrategie (§ 3.4);
- opstellen onderzoeksvraag (§ 3.5).

3.2 Formuleren aanleiding en doel van het onderzoek

Het is van belang de aanleiding en het doel van het voorgenomen onderzoek zo scherp mogelijk te formuleren. Beide zijn bepalend voor de manier waarop het onderzoek uitgevoerd moet worden en voor de wijze van interpretatie en rapportage van de resultaten.

Onderzoek naar bodemverdichting kan worden ingezet om te bepalen in hoeverre:

- bodemverdichting bijdraagt aan problemen in de waterhuishouding, zoals plasvorming op landbouwgrond en hoge piekafvoeren in watergangen in landelijk gebied. Dit kan bijvoorbeeld actueel zijn agrariërs en waterschappen zoeken naar oplossingen voor de genoemde problemen;
- bodemverdichting bijdraagt aan slechte begaanbaarheid van percelen als gevolg van bovenstaand punt;
- bodemverdichting en daarmee gerelateerde problemen toenemen in de tijd. Het waterschap kan deze informatie nodig hebben om toekomstplannen te maken en/of als uitgangspunt in overleg met agrariërs over het waterbeheer in een gebied;
- bodemverdichting voor gemeenten een onderwerp is om bodembeleid te ontwikkelen voor in een omgevingsvisie;
- welke factoren bodemverdichting beïnvloeden en daarmee welke maatregelen genomen kunnen worden om bodemverdichting en de effecten ervan te voorkomen of te doen afnemen. Dit is vooral interessant om handelingsperspectief voor oplossingen te bieden aan agrariërs;
- bodemverdichting de oorzaak is van geconstateerde gewasstress met achterblijvende opbrengst. Als de ontwikkeling van planten op een bepaald (deel van) een perceel achterblijft, kan dit (deels) veroorzaakt worden door verdichting. Ook dit is interessant om handelingsperspectief te bieden aan agrariërs.

Mogelijke doelen van onderzoek naar en monitoring van de bodemverdichting zijn het in beeld brengen van:

- in hoeverre agrarische percelen verdicht zijn;
- welke ruimtelijke verbreiding en variatie er is binnen en/of tussen percelen;
- wat de ontwikkeling is in de tijd (monitoring).

Afgeleide doelen kunnen zijn:

- het achterhalen van de oorzaak of oorzaken van bodemverdichting;
- het mogelijk maken van besluitvorming door agrariërs en loonwerkers of andere bedrijven die grondverzet uitvoeren, over maatregelen om (verdere) bodemverdichting te voorkomen, weg te nemen of af te remmen. Zie ook de toelichting in het kader in hoofdstuk 6;

- het kunnen anticiperen door waterschappen op (verergerende) effecten van bodemverdichting op de waterhuishouding door opvang van verhoogde piekafvoeren mogelijk te maken.

Mocht in een specifieke situatie de aanleiding en/of het doel afwijken van bovengenoemde, dan moet deze aanleiding en/of dit doel worden betrokken in het vervolg.

3.3 Benodigde informatie voor het onderzoek

Naast aanleiding en doel van het onderzoek is de onderzoeksstrategie mede afhankelijk van de volgende factoren:

- eisen en randvoorwaarden van betrokken actoren (§ 3.3.1);
- Conceptual Site Model (CSM) bodemverdichting (§ 3.3.2);
- overige gebiedseigenschappen (§ 3.3.3);
- eisen aan de output/interpretatie (§ 3.3.4);
- planningsaspecten (§ 3.3.5).

Het ligt voor de hand dat de opdrachtgever hier primair initiatief in neemt en deze informatie verstrekt bij de offerte-aanvraag. Het is ook denkbaar dat de opdrachtgever ervoor kiest deze informatie door derden te laten inventariseren en rapporteren.

3.3.1 Eisen en wensen van betrokken actoren

Deze paragraaf biedt handvatten om wensen en verplichtingen vanuit de eigen organisatie en andere betrokken actoren te inventariseren. Deze kunnen medebepalend zijn voor de opzet en uitvoering van het bodemonderzoek. Het is daarom belangrijk om vroegtijdig met de betrokken actoren in gesprek te gaan om deze eisen en wensen in beeld te brengen.

Deze paragraaf beschrijft voorbeelden van wensen en eisen die aan de orde kunnen zijn.

Wettelijke en beleidsmatige eisen/randvoorwaarden vanuit overheden

Momenteel zijn er geen wettelijke eisen aan (het onderzoek naar) verdichting. Het is mogelijk dat regionale overheden (provincies, waterschappen) beleid hebben met betrekking tot verdichting of het daaraan gerelateerde waterbeheer. Het is zinvol om bij de start van het onderzoek na te gaan hoe het eventuele overheidsbeleid een rol kan spelen bij de formulering van de onderzoeksvragen.

Eisen vanuit de (overheid als) opdrachtgever

Vanuit de organisatie van de opdrachtgever kunnen eisen of randvoorwaarden voor het onderzoek gelden, zoals:

- eisen uit contractuele verplichtingen (zijn er contractuele afspraken in het te onderzoeken gebied, bijvoorbeeld m.b.t. de waterhuishouding);
- eisen die vanuit de financiering van toepassing zijn (wordt er bijvoorbeeld subsidie aangevraagd voor het onderzoek of valt het binnen een groter onderzoeksprogramma);
- eisen vanuit een uitvoeringsprogramma of beheerprogramma;
- eisen die vanuit het aanbestedingsreglement van toepassing zijn (algemene inkoopvoorwaarden e.d.);
- eisen vanuit budgettering. Bijvoorbeeld indien het kasritme van de facturatie (onderzoekinspanning) van belang is voor de planning.

Rol en verantwoordelijkheden van de opdrachtgever

Denk hierbij bijvoorbeeld aan:

- waterkwantiteitsbeheer (waterschap);
- de taak van belangenorganisaties en collectieven van agrariërs om hun leden goede voorlichting te geven over het in stand houden van de kwaliteit van de landbouwgrond voor gewasproductie.

Eisen vanuit de eigenaar/gebruiker van de te onderzoeken percelen

Denk hierbij aan:

- *voorwaarden aan betreding* (bijvoorbeeld: alleen betreden na de oogst, niet tijdens broedseizoen, alleen tegen vergoeding van schade, melden voor betreding);
- *voorwaarden aan destructief onderzoek* (bijvoorbeeld: herstel van boorgaten, herstel van doorboorde afsluitende lagen, aanvullen met schone gebiedseigen grond in geval grote hoeveelheden grond voor onderzoek worden afgevoerd, exacte plaats voor proefkuilen);
- *voorwaarden aan uitkomsten onderzoek benodigd voor een mogelijk bruikbaarheid handelingsperspectief om verdere verdichting te voorkomen of om reeds opgetreden verdichting te herstellen* (bijvoorbeeld: zodanige ligging van raaien zodat herhalingsmetingen praktisch mogelijk zijn of de effecten van zetting door berijden optimaal meetbaar zijn);
- *overlast bij gebruiker en overige omwonenden waarmee rekening gehouden moet worden* (bijvoorbeeld bij de inzet van drones of parkeren van veldwerkapparatuur).

Overige randvoorwaarden

Generieke overkoepelende kaders zijn altijd van toepassing, bijvoorbeeld:

- Flora- en faunawet en daarin opgegaan per 1-1-2017 Wet Natuurbescherming;
- restricties aan gebruik luchtruim (drones, vliegtuigen).

3.3.2 Conceptual Site Model (CSM) bodemverdichting

Het Conceptual Site Model (CSM) is een geschikte methodiek om de beschikbare informatie over de voor bodemverdichting relevante bodemkenmerken – en daarmee samenhangend de kenmerken van het oppervlaktewater en grondwater – op een systematische manier in kaart te brengen en te presenteren.

Een opdrachtgever zal niet in alle gevallen beschikken over een geschikt of volledig CSM. In dat geval kan hij ervoor kiezen het opstellen van een CSM door derden te laten opstellen. Het heeft grote meerwaarde om bij het opstellen van het CSM gebruik te maken van (visuele) waarnemingen van de gebruikers van het onderzoeksgebied.

Conceptual Site Model (CSM)

Afhankelijk van de situatie kan het een eenvoudige tot uitgebreide schematische beschrijving of visualisatie zijn van de situatie in het veld. Niet alleen de verticale opbouw is van belang maar vooral ook de horizontale ruimtelijke variaties en variaties in de loop van de tijd in deze aspecten – al dan niet gecombineerd.

Afhankelijk van het stadium van onderzoek dient het CSM als uitgangspunt voor het opstellen van een onderzoeksvraag (kennishiaten), opzet voor het onderzoek, middel om resultaten te visualiseren in de rapportage of om maatregelen te ontwerpen of toe te passen.

Nieuw verkregen inzichten (aanvullende gegevens of monitoringsgegevens) kunnen worden gebruikt om het model te actualiseren of aan te vullen.

In de NTA 5755 wordt het principe beschreven van een CSM en de wijze van gebruik van een CSM in een onderzoekstraject.

Een aanpak met een CSM kan het proces van onderzoek, interpretatie en visualisatie ondersteunen.

In een CSM voor bodemverdichting kunnen de volgende algemene aspecten van verdichting aan de orde komen (niet-uitputtende opsomming):

- Geografische aspecten:
 - *topografie en reliëf*: Kunnen aanleiding geven tot ophoping van regenwater, wat ook veroorzaakt kan zijn door verdichting. Variaties in topografie kunnen daarmee leiden tot lokale afwijkingen van vochtkenmerken van de ondergrond.
- Bodem-fysische aspecten, zoals:

- *bodemopbouw en gelaagdheid*: Variaties in bodemsamenstelling en textuur kunnen leiden tot ander vocht- of groeikarakteristieken van de ondergrond en planten. Natuurlijke variaties in bodemsamenstelling beïnvloeden het effect van mechanische bodembelasting;
 - *textuurveranderingen*: Door veranderingen in textuur verandert de aeratie en warmtegeleiding van de bodem (verschillen in dichtheid en aeratie komen tot uiting in verschillen in temperatuur van de bodem);
 - *kleigehalte*: Gevoeligheid van de bodem voor verdichting is afhankelijk van de initiële draagkracht van de bodem (structurele sterkte of pre-compressiestress PCS). De PCS is afhankelijk van vochttoestand en kleigehalte. Als belasting van de bodem wordt overschreden dan gedraagt de bodem zich plastisch i.p.v. elastisch;
 - *natuurlijke klink*: proces van volumevermindering van de bodem door natuurlijke rijpingsprocessen van drooggelegde bodems;
 - *bodemdaling*: vernatting door bodemdaling kan een toename van de bodemverdichting tot gevolg hebben;
 - *indringingsweerstand van de bodem*: Een lage indringingsweerstand treedt op bij vochtige bodem. Deze laatste kan het gevolg zijn van verdichting. Een lage indringingsweerstand zal leiden tot diepere spoorvorming (banden van landbouwvoertuigen dringen makkelijker in de bodem). Grotere spoorvorming komt tot uiting in de terreinruwheid. Variaties in verdichting komen tot uiting in variaties in terreinruwheid;
 - *stagnerende omzet organisch materiaal*: Een lange omzettijd van organische stof duidt op een verminderde aeratie van de bodem. De aeratie neemt af door verdichting. Anderzijds zal organische stof de belasting dempen.
- Grondwateraspecten, zoals:
 - *Vochtgehalte*: Indien sprake is van een verhoogd vochtgehalte is een representatieve directe meting van de bodemverdichting niet goed mogelijk;
 - *Verhoogde grondwaterstand*: In gebieden waar de bodem is verdicht infiltreert regenwater relatief langzaam;
 - *Schijn-grondwaterspiegel*: In gebieden waar de bodem is verdicht of in bodems met ondoorlatende tussenlagen kan een schijnwaterspiegel ontstaan;
 - *Plasvorming*: Plasvorming duidt op verdichting maar kan ook andere oorzaken hebben als op depressies door lokale klink;
 - *Ligging en diepte drainagesysteem*: In gebieden waar de bodem is verdicht infiltreert regenwater relatief langzaam. Een verdichte bodem kan echter met een drainagesysteem worden ontwaterd. Een goed ontwaterde bodem sluit daarmee verdichting niet op voorhand uit, het is ook nodig te weten hoe de niet natuurlijke drainage van een bodem is geregeld;
 - *Verhoogde oppervlakkige piekafvoer van regenwater*: In gebieden waar de bodem is verdicht infiltreert regenwater relatief langzaam en zal het regenwater meer horizontaal afstromen;
 - *Oppervlaktewater met verhoogde afvoer of afwijkende samenstelling door afspoeling*: In gebieden waar de bodem is verdicht infiltreert regenwater relatief langzaam en zal het regenwater meer horizontaal afstromen en daarmee nutriënten meenemen.
 - Landbouwkundige aspecten, zoals:
 - *informatie over geteelde gewassen*: penwortels of sorghum kunnen een verminderende werking hebben op verdichting, terwijl monocultuur en teelt van rooigewassen een toename van bodemverdichting tot gevolg kunnen hebben;
 - *Informatie over groei en ontwikkeling van planten*: In gebieden waar de bodem is verdicht is de groei van planten relatief laag;

- *Biomassa/gewasopbrengst*: De biomassa neemt af bij verdichting. De afname kan ook andere oorzaken hebben bijvoorbeeld gerelateerd aan het bodemgebruik. In gebieden waar de bodem is verdicht is de oogst relatief laag;
 - *Bewortelingsdiepte/ontwikkeling van de wortels*: In gebieden waar de bodem is verdicht is de bewortelingsdiepte relatief gering wat kan leiden tot lagere biomassa en gewasopbrengst;
 - *Bemesting*: Mate van bemesting en met aangegeven de reden voor differentiatie;
 - *Uitspoeling nutriënten naar oppervlaktewater*: Een hoge plaatselijke uitspoeling van nutriënten kan duiden op verdichting;
 - *Bouwplan met rooivruchten*: Bij teelt van rooivruchten laatste vindt relatief zware belasting met landbouwmachines plaats.
- Gebruikersaspecten als:
 - *Bijzonder/afwijkend gebruik van een perceel*: Bijzondere soorten bodemgebruik met hoge belasting kunnen leiden tot verdichting;
 - *Type landgebruik*. Per type komt verdichting anders tot uiting:
 - Akkerbouw: Vindt plaats vanaf de ploegzool en dieper. In de ploegvoor wordt verdichting steeds weer opgeheven door ploegen. In de bouwvoor (de bovenste laag grond waarin de meeste wortelvorming plaatsvindt) gaat bodemstructuur achteruit;
 - Grasland: verdichting van bouwvoor bij weinig grondbewerking en berijden onder natte omstandigheden;
 - *Rijpatronen met landbouwvoertuigen*: Is de verdichting te verwachten in duidelijke vaste rijbanen of vindt berijding plaats over het gehele perceel?;
 - *Plaats waar landbouwvoertuigen keren of waar regelmatig met landbouwvoertuigen wordt gereden*. Dit speelt vooral op kopakkers. Hier is veelal meer sprake van verdichting dan midden op het perceel;
 - *Is een transportleiding door een perceel heen aangelegd?*
 - *Aard en type landbouwvoertuigen*: Landbouwvoertuigen van hoog gewicht en relatief smalle banden met hoge bandespanning geven groter risico op verdichting;
 - *Moment van rijden over percelen*: In natte condities is het land meer vatbaar voor verdichting dan in droge condities;
 - *Informatie over opslag van zware objecten of oogst*: Opslag geeft een andere vorm van plekken met verdichting dan rijbanen;
 - *Toegepaste grondbewerking en ploegen*: Het type grondbewerking (ploegen, spitten, diep ploegen, no tillage etc), de frequentie (aantal werkgangen per jaar) en de diepte daarvan hebben een versterkend of verminderend effect op verdichting;
 - *Wordt bij ploegen gereden in de ploegvoor of daarbuiten?* Dit is bepalend voor de diepte waarop verdichting ontstaat en de snelheid waarmee het zich ontwikkelt;
 - *Veranderingen in gewasopbrengsten*: Gebieden met een steeds verder afnemende gewasopbrengst duiden op verdichting;
 - *Productiestatistieken in de loop van de tijd*: Geven inzicht in het mogelijk verloop in de tijd van het proces;
 - *Moment van oogst*: Bij verdichting is later in het seizoen het gewas geschikt voor oogsten als gevolg van een achterblijvende ontwikkeling en rijping van gewassen;
 - *Insporing*: Mate van vervorming van de bodem na het berijden na verloop van tijd (insporing duidt op verdichting doordat de bodemtextuur verandert).
 - Historische aspecten, zoals:
 - *Gebruik van de locatie*: Type van gebruik van de locatie in de loop van de tijd;

- *Herinrichting en aanpassingen in de topografie:* Veranderingen die in voorgaande aspecten in de loop van de tijd zijn aangebracht. Denk ook aan bijvoorbeeld slootdempingen, ophogingen of grondverbeteringen;
- *Grondverzet:* Inzet van zwaar materieel of (tijdelijke) opslag van grond kan tot lokale verdichting leiden. Vergravingen kunnen de structuur en opbouw van de bodem plaatselijk verstoren;
- *Incidenten, calamiteiten of herstelactiviteiten:* denk aan bijvoorbeeld dijkdoorbraken, lokale spills door landbouwvoertuigen, vliegtuigbommen of -wrakken.



Inzet van zware landbouwmachines

Door zo veel mogelijk van bovenstaande informatie in het CSM te verwerken kan een goed beeld van de ondergrond worden verkregen en worden ook de hiaten in beeld gebracht. Met name horizontale variaties zijn van belang om in beeld te hebben. Het ligt dan ook voor de hand de verzamelde informatie in verschillende kaartlagen te verzamelen, eventueel per verschillende dieptehorizon van de bodem.

Het CSM vormt de basis voor het formuleren van de gerichte onderzoeksvragen (op basis van het onderzoeksdoel, aangevuld met de hiaten in kennis), de onderzoeksstrategie en de interpretatie van de nieuw verkregen meetresultaten.

Cyclisch onderzoekproces

In de praktijk zal veelal niet kunnen worden volstaan met het eenmalig doorlopen van een onderzoek; er zal eerder sprake zijn van een *cyclisch of iteratief proces*. Nadat de eerste ruwe versie van een CSM is opgesteld zal de eerste set aan nieuw verkregen onderzoeksresultaten, gezien het transdisciplinaire karakter van onderzoek naar verdichting, niet direct leiden tot een volledig en compleet beeld van de situatie. De hiervoor genoemde aspecten die bepalen hoe verdichting zich ontwikkelt en manifesteert, illustreren dit complexe karakter van het onderzoek.

Nieuwe informatie zal leiden tot nieuwe inzichten, wat weer zal leiden tot een bijstelling van het CSM. Op basis daarvan kan nieuw veldonderzoek worden uitgevoerd of de bestaande informatie opnieuw worden geïnterpreteerd. Hierin worden alle onderzoeksgegevens, evenals (visuele) waarnemingen en praktische kennis van het gebied van met name gebruikers geïntegreerd tot één coherent beeld van de situatie. Deze iteraties kunnen zo enkele fasen beslaan.

Wat het onderzoek complex maakt is dat verschillende factoren kunnen bepalen of verdichting zal leiden tot overlast en dat de 'nulwaarde' niet op voorhand vaststaat. Wel zijn ter referentie de volgende vuistregels beschikbaar om te beoordelen of sprake is van bodemverdichting³:

- Bij zandgronden is sprake van bodemverdichting als de bulkdichtheid hoger is dan 1,6 gr/cm³.
- Bij kleigronden is de normwaarde voor de acceptabele bulkdichtheid een functie van het lutumgehalte. Bij kleigronden er is sprake van verdichting indien:
Bulkdichtheid > 1,75 – 0,0009*(% lutum) gr/cm³.

Per stap in de iteratie kunnen besluiten nodig zijn met betrekking tot inhoud, kosten, mate van detail of betrouwbaarheid van het onderzoek. Daarom is gedurende het onderzoek regelmatige afstemming tussen opdrachtgever en onderzoeker noodzakelijk.

De eerste stap in de iteratie kan een pilot (testmeting) zijn, met als doel om de toepasbaarheid van de gebruikte onderzoekstechniek voor de specifieke lokale omstandigheden te onderzoeken en zo nodig de onderzoeksopzet bij te stellen. Hoofdstuk 4 gaat verder in op de rol van een pilot in een onderzoeksaanpak.

Kennisvragen bodemverdichting

Het onderzoek naar bodemverdichting is relatief nieuw. Er is al veel onderzoek gedaan, maar er zijn ook nog de nodige fundamentele kennisvragen over het fenomeen van verdichting als zodanig, en over hoe verdichting is te meten. Vooral deze laatste zijn van belang bij het opstellen van een CSM, het uitvoeren van het onderzoek en vooral het interpreteren van de meetresultaten. Enkele kennisvragen zijn:

- Er is nog geen pasklaar antwoord op de vraag: hoe ijk/link je de resultaten van individuele indirecte metingen (bijv. GPR) aan verdichting.
De details van natuurlijke variaties in bijvoorbeeld bodemsamenstelling vergeleken met variaties die door verdichting ontstaan, indringingsdiepte (kN/cm²) en bewortelbaarheid, zijn nog niet bekend. Dat maakt het lastig om op betrouwbare wijze verdichtingsmetingen interpoleren.
- Er is geen vaste definitie voor wat 'verdichte bodem' is. De pF en k(h) worden indicatief geschat zonder dat een validatie mogelijk is. Het gaat in de praktijk om relatieve verschillen in pF en k(h).
- Er zijn nauwelijks kwantitatieve inzichten in de effecten van verdichting op de vochtuithouding van de bodem. Op basis van vocht karakteristiek kan doorlatendheidscurve worden berekend. Is echter gebaseerd op aannames van verzadigde doorlatendheid en hellingshoek van de doorlatendheidscurve.
- Meten van de verzadigde doorlatendheid is complex en kan bij macroporiën tot grote overschatting van de werkelijke situatie in het veld leiden.

Het bodemsysteem en de plaats van bodemverdichting daarin

Bij het uitvoeren van onderzoek naar verdichting is inzicht in het bodemsysteem als geheel van groot belang. Bij landbouwgronden manifesteert de verdichting door gebruik van zwaar materieel zich als een 'subtiele' compactie van de korrelmatrix. Hiermee wordt bedoeld dat de korrelmatrix maar relatief weinig samen hoeft te verdichten om te kunnen leiden tot ongewenste effecten. Dat maakt het onderzoek naar verdichting lastig. Hieronder wordt dit toegelicht.

Dit gegeven maakt dat als sprake is van ongewenste effecten, de verdichting zelf mogelijk nog lastig meetbaar is met directe metingen in het veld. Dat geldt in het bijzonder voor de gebiedsdekkende technieken van indirecte gidsparameters, waarop deze handreiking is gericht. Met gebiedsdekkende elektronische meettechnieken kunnen de subtiele veranderingen in de bodemgesteldheid niet goed en onderscheidend worden gemeten. Wat een extra beperking is bij gebiedsdekkende technieken is dat de zone waarop de verdichting zich progressief ontwikkelt zich niet aan maaiveld bevindt. De verdichting manifesteert zich dieper; afhanke-

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

lijk van het gebruik van het perceel op een diepte vanaf 0,3 tot 0,7 m beneden maaiveld. Met de meeste gebiedsdekkende technieken goed kunnen deze diepere bodemlagen echter niet goed worden onderzocht. Deze technieken zijn vooral geschikt om kenmerken op maaiveldniveau te meten. De mogelijkheden van gebiedsdekkende elektronische technieken liggen daarmee vooral op de meting van de gevolgen van bodemverdichting. Keerzijde van deze aanpak is dat de gevolgen van bodemverdichting niet 1 op 1 zijn te koppelen aan verdichting. Voorbeelden zijn:

- Plasvorming na regen kan veroorzaakt worden door verdichting, maar ook door verslemping, korstvorming of door plaatselijke natuurlijke klink van de bodem waardoor een depressie ontstaat waarin zich regenwater ophoopt.
- Natuurlijke rijpingsprocessen hebben deels dezelfde effecten op de ondergrond. Dit speelt bijvoorbeeld in de Flevopolder.
- De gewastoeestand is niet alleen van bodemverdichting afhankelijk, maar ook van parameters als topografie, bewortelingsdiepte, ontwateringstoestand, bodemsamenstelling en textuur, nutriëntbeschikbaarheid, variaties in bewerking, bemesting, beregening.

Deze keerzijde vraagt om een onderzoeksstrategie waarbij alle mogelijke oorzaken voor afwijkende fenomenen in de bodem systematisch in beeld worden gebracht en de nieuwe metingen samen met anderszins verkregen informatie in onderlinge samenhang worden geïnterpreteerd. Verificatiemetingen met directe metingen in het veld zullen vaak nodig zijn om definitief vast te stellen waar in welke mate sprake is van verdichting of andere processen. Dit vergt niet alleen gedegen vakkennis van het proces verdichting, maar ook vakkennis van het bredere vakgebied 'bodem'. Denk hierbij aan kennis van de waterhuishouding, bodemkunde, plantengroei of (bio)chemische bodemprocessen.

3.3.3 Overige gebiedskenmerken

Naast het CSM, is het van belang om overige eigenschappen van het gebied te benoemen die van invloed zijn op de praktische uitvoerbaarheid of kosten van het onderzoek.

Denk aan (niet-uitputtende opsomming):

- ligging en omvang (coördinaten, kaart etc.);
- ondergrondse objecten als kabels, leidingen, kelders, opslagtanks en voorzieningen met kathodische bescherming;
- bebouwing en bovengrondse inrichting. Denk hierbij ook aan watergangen, begroeiing, hekwerken en schrikdraadbeveiliging;
- betreedbaarheid/draagkracht voor verschillende soorten voertuigen.

3.3.4 Eisen aan het onderzoeksresultaat

De uiteindelijke onderzoeksresultaten (metingen en interpretatie) moeten de opdrachtgever, en eventuele andere betrokken partijen, in staat stellen om besluiten over het vervolg te nemen. Dit stelt eisen aan de output en interpretatie van de meetresultaten.

Hulpvragen voor opdrachtgevers om de eisen aan de output te formuleren zijn (niet-uitputtende opsomming):

- Is een globaal beeld van de problematiek gewenst (bijvoorbeeld om een eerste indruk van de verdichting op een perceel of gebied te krijgen) of een specifiek beeld (om de ontwikkeling van de verdichting in de loop van de tijd te monitoren of om maatregelen te kunnen treffen)?
- Indien verdichting indirect gemeten wordt: Op welke wijze zijn de meetresultaten te koppelen aan de mate van verdichting? Welke mate van zekerheid is nodig dat de gemeten parameter inderdaad gecorreleerd is aan verdichting? In welke eenheid dient de verdichting gerapporteerd te worden? Is wel/niet verdicht voldoende of is ook een kwantitatief inzicht in de mate van verdichting nodig?
- Is er een handelingsperspectief, en zo ja op welke schaal? Op de schaal van het hele te onderzoeken gebied, op perceelschaal of nog kleiner? (Bijvoorbeeld: aanpassen spanning en breedte van banden van landbouwvoertuigen of aanpassen pompcapaciteit van een poldergemaal.)
- Is er een toetsingskader? Er is geen landelijk toetsingskader voor Bodemverdichting. Indien een opdrachtgever een eigen toetsingskader heeft, geeft dat kaders aan voor het onderzoek. Bijvoorbeeld: het toetsingskader om te bepalen bij welke gewasopbrengst maatregelen genomen

worden om de verdichting te verminderen. Of: als meer dan een bepaald percentage of oppervlakte van het areaal van een agrariër ernstig verdicht is, gaat het waterschap met hem in gesprek om te bezien welke maatregelen mogelijk en nodig zijn.

- Is een vlakdekkend beeld nodig of zijn punt- of lijnmetingen voldoende? In dat laatste geval: is interpolatie nodig en welke eisen/voorwaarden worden daaraan gesteld en welke houvast geeft het CSM voor interpolatie van metingen?
Voorbeeld ter illustratie van vlakdekkend of punt- of lijnmetingen: Vlakdekkende metingen zullen vooral gebruikt worden toegepast om variaties binnen een perceel in beeld te brengen of progressie van verdichting in de loop van de tijd te monitoren. Punt- of lijnmetingen zullen vooral voor het ijkken van globale metingen worden toegepast of om de effecten van preventieve of curatieve metingen in detail te meten.
Voorbeeld ter illustratie van houvast voor interpolatie: Bij het interpoleren moet rekening gehouden worden met de oorzaak van het te interpoleren fenomeen en met het inzicht in zijn ruimtelijke variaties. Als een verhoogd bodemvochtgehalte wordt veroorzaakt door rijsporen in de lengterichting van een perceel of door de aanleg van een transportleiding door een perceel, zullen meetwaarden vooral een contour vertonen met een langgerekte vorm. Als een verhoogd bodemvochtgehalte wordt veroorzaakt door plasvorming in natuurlijke depressies in het maaiveld, zullen meetwaarden vooral een contour vertonen met een vorm die de topografie volgt. Combinaties van beide contouren zijn ook mogelijk en dit vergt een gecombineerde analyse van de mogelijke oorzaken van de meetresultaten.
- Dient de opdrachtnemer conclusies te trekken op basis van de uitkomsten van het onderzoek en hieraan aanbevelingen te koppelen of doet de opdrachtgever dat zelf?

3.3.5 Planningsaspecten

Benoem planningsaspecten voor zover deze relevant kunnen zijn voor het onderzoeksplan. Bijvoorbeeld:

- gebied is alleen buiten het groeiseizoen te betreden;
- resultaten zijn voor een bepaalde deadline nodig;
- elk deelgebied/perceel moet eens in de X jaar gemonitord worden.

3.4 Formuleren onderzoeksstrategie

De onderzoeksstrategie bestaat uit een beschrijving van de toe te passen meettechniek (of combinatie van meettechnieken) met daaraan gekoppeld een meetdichtheid (hoeveelheid meetpunten per oppervlakte, hoeveelheid meettraaien e.d.).

Gezien de beperkte ervaring die er op dit moment is met verdichtingsonderzoek in het landelijk gebied, is het raadzaam om een deskundig adviesbureau en vertegenwoordigers van de betrokken partijen te betrekken bij het bepalen van de onderzoeksstrategie voor een gebied (dit is ook aangegeven in figuur 2.1).

Omdat deze handreiking uitgaat van onderzoek op gebiedsniveau, zal een eerste stap in het onderzoek veelal bestaan uit de toepassing van gebiedsdekkende elektrische technieken waarmee het gebied aan de hand van een of meer gidsparameters in beeld wordt gebracht. Aan de hand van directe metingen worden de gidsparameters geverifieerd en wordt een gebiedsdekkende uitspraak gedaan over de mate van verdichting in het gehele onderzoeksgebied.

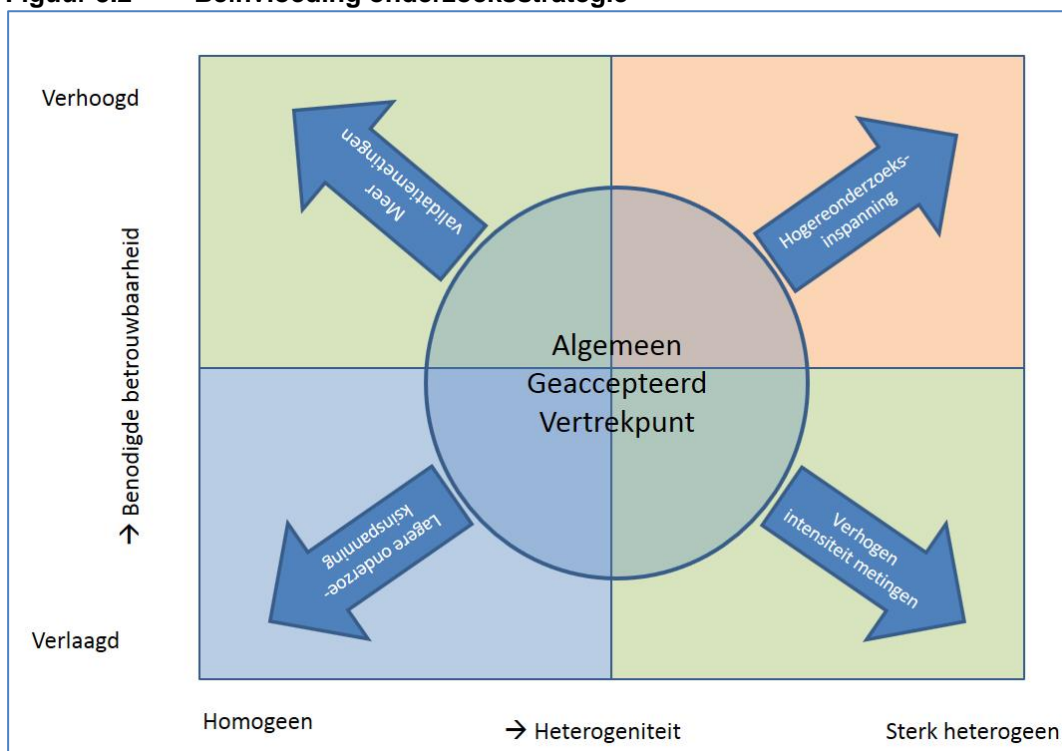
De keuze voor de meettechniek wordt bepaald op basis van alle informatie die met de toepassing van de paragrafen 3.2 en 3.3 is verkregen, waardoor bijvoorbeeld duidelijk is geworden op welke schaal je wilt meten, wat de gebiedskenmerken zijn en op welke diepte in de bodem je de verdichte laag verwacht. Naast deze gegevens, die min of meer vast staan, zijn er twee factoren van belang voor het bepalen van de (combinatie van) techniek(en)/meetdichtheid. Dit zijn de (verwachte) heterogeniteit waarin de te meten parameter zich voordoet en de benodigde betrouwbaarheid waarmee deze parameter gemeten moet worden. Zie voor een toelichting op beide termen § 1.7. Een derde

factor, de (verwachte) variatie in de tijd, bepaalt vervolgens hoe vaak er gemeten moet worden (alleen relevant bij monitoring).

Voor het onderzoek naar verdichting is in hoofdstuk 4 een onderzoeksstrategie uitgewerkt als geaccepteerd vertrekpunt voor grootschalig onderzoek naar verdichting. Deze kan voor een specifieke situatie als vertrekpunt voor het opstellen van een onderzoeksplan worden gebruikt. In figuur 3.2 is weergegeven hoe de onderzoeksstrategie wijzigt als de verwachte heterogeniteit en/of de gewenste betrouwbaarheid hoger of lager wordt. Het geaccepteerde vertrekpunt wordt gesymboliseerd door de cirkel in het midden.

Uit de figuur is af te leiden dat als sprake is van een verhoogde heterogeniteit een hogere dichtheid van informatie (meetdichtheid) nodig is. Als hogere eisen aan de betrouwbaarheid worden gesteld zullen meer directe (validatie)metingen nodig zijn.

Figuur 3.2 Beïnvloeding onderzoeksstrategie



Verklaring van de kwadranten
 blauw = relatief lage onderzoeksinspanning,
 groen = gemiddelde onderzoeksinspanning
 oranje = relatief hoge onderzoeksinspanning

3.5 Formuleren onderzoeksvraag

Op basis van bovenstaande verzamelde informatie wordt de onderzoeksvraag geformuleerd. Besteed hierbij aandacht aan de volgende aspecten (niet-uitputtende opsomming):

- Welk probleem vormt de aanleiding voor het onderzoek en wat moet de bijdrage van het onderzoek zijn aan de oplossing van het probleem?
- Voor wie is het onderzoek uiteindelijk bedoeld?
- Wat moet er gemeten worden en waarom, om het CSM verder in te vullen?
- Op welke schaal moet het onderzoek plaatsvinden (gebied, perceel)?
- Wanneer en/of met welke herhalingsfrequentie?

De onderzoeksvraag vormt, samen met de informatie die volgt uit het toepassen van § 3.2 t/m § 3.4, de basis voor de uitvraag (zie hoofdstuk 5).

4 Toetsing haalbaarheid onderzoekwensen aan beschikbare technieken

4.1 Inleiding

Na het formuleren van de kaders en de onderzoeksstrategie (aan de hand van de aanwijzingen in hoofdstuk 3) kan de opdrachtgever in principe overgaan tot het opstellen van een uitvraag voor de uitbesteding van het daadwerkelijke onderzoek. Alvorens hiertoe over te gaan is het raadzaam om de haalbaarheid van het de geformuleerde onderzoeksstrategie te toetsen.

Dit hoofdstuk beschrijft de technieken en een onderzoeksstrategie die gebruikt kunnen worden om verdichting te meten, inclusief voor- en nadelen en aandachtspunten. Op basis van de informatie in dit hoofdstuk kan de opdrachtgever zo nodig de kaders en/of de onderzoeksstrategie bijstellen alvorens de uitvraag op te stellen.

Zoals beschreven in hoofdstuk 1 is het onderzoek naar verdichting, en dan met name onderzoek op grotere schaal, relatief nieuw. Voor enkele technieken die in dit hoofdstuk behandeld worden is er nog weinig of geen ervaring met de toepassing voor het meten van verdichting. Bij het opstellen van deze eerste versie van deze handreiking heeft geen validatie met pilotmetingen plaatsgevonden. Daarom kan deze handreiking niet verder gaan dan het beschrijven van de potentiële toepasbaarheid van de betreffende technieken voor het meten van bodemverdichting. Daarom benoemt dit hoofdstuk ook de kennisvragen voor de toepassing van technieken voor onderzoek naar verdichting en voor de interpretatie van de resultaten daarvan.

Als in de toekomst bepaalde onderzoekstechnieken wel gevalideerd zijn en geschikt zijn gebleken, of als uit onderzoeksprogramma's nieuwe inzichten worden verkregen (al dan niet inhakend op de genoemde kennisvragen) zal deze handreiking daarop aangepast worden. Daarmee zal deze handreiking in de toekomst stapsgewijs beter toepasbaar worden voor routinematig onderzoek.

4.2 Toepasbare technieken

Deze paragraaf beschrijft de technieken die geschikt (kunnen) zijn om bodemverdichting te onderzoeken. Per techniek worden de eigenschappen, het toepassingsgebied en de voor- en nadelen beschreven. Dit wordt met bijlage 2 ondersteund met technieksheets voor onderzoekstechnieken waarmee indirecte gebiedsdekkende informatie van verdichting kan worden verkregen. Daarnaast kan aanvullende informatie per techniek worden gevonden op bodemrichtlijn.nl. Op basis van deze informatie kan de opdrachtgever bepalen:

- of de gewenste onderzoeksstrategie (zie § 3.4) haalbaar is met bestaande technieken;
- welke technieken in aanmerking komen voor de specifieke situatie.

Let er hierbij ook op of sprake is van herhalingsmetingen (monitoring) of een eenmalig onderzoek. Bepaalde technieken zijn beter geschikt voor herhalingsmetingen dan andere technieken.

Deze informatie kan ook behulpzaam zijn bij de keuze van aanbieders die gevraagd kunnen worden om een offerteverzoek te doen. Ook kan deze informatie een hulpmiddel zijn bij het beoordelen van offertes.

Bij de selectie van toepasbare technieken speelt het gegeven dat bodemverdichting alleen direct meetbaar is met kosten-intensieve destructieve puntmetingen (zie de voorbeelden in § 4.2.2). Voor grootschalig onderzoek zijn verschillende gebiedsdekkende elektronische technieken beschikbaar die echter alleen 'indirecte aanwijzingen' geven (gidsparameters) voor de aanwezigheid van ver-

dichting (zie de voorbeelden in § 4.2.1 en de technieksheets in bijlage 1). Als deze metingen worden gecombineerd met 'directe' meettechnieken (kalibratie) is efficiënt en kostenbewust onderzoek naar verdichting mogelijk.

Nogmaals wordt opgemerkt dat het onderzoek naar bodemverdichting in agrarisch gebied sterk in ontwikkeling is (zie het kader in § 3.3.2). Dit houdt in dat de toepasbaarheid van de nu volgende onderzoekstechnieken deels nog bewezen of nog verder doorontwikkeld moet worden. Meer concrete aanwijzingen over hoe een onderzoek naar bodemverdichting met de volgende technieken precies moet worden vormgegeven, zijn daarom nu niet te geven.

4.2.1 Indirecte meting van bodemdichtheid

Zoals beschreven in § 3.3.2 over het CSM, zijn er verschillende gidsparameters die (kunnen) wijzen op bodemverdichting. Door meerdere gidsparameters te meten, kan – in combinatie met het CSM – geconcludeerd worden of de bodem al dan niet verdicht is. Voor meer informatie over de geschikte meettechnieken zie bijlage 1. Daarnaast zijn enkele van de hier genoemde technieken ook voor wat hun algemene toepasbaarheid uitgebreid beschreven op de internetsite www.bodemrichtlijn.nl (in beheer bij het Ministerie van I&W). Hierin zijn ook hyperlinks opgenomen voor meer detailinformatie, cases en techniekaanbieders.

Opgemerkt moet worden dat van onderstaande technieken in de markt onder verschillende merknamen, verschillende varianten en verschillen in meetopstelling en specificaties worden aangeboden. Ook kunnen (afhankelijk van het type) meerdere technieken gecombineerd zijn in één apparaat of kan de gebruiker zelf meerder apparaten combineren. Op die wijze kunnen in één meetronde meerdere technieken in één keer worden toegepast.

Mechanische vervormingsweerstandsensor

Met deze on-the-go-sensor wordt al rijdend over het veld de mechanische vervorming van het bovenste deel van de bodem gemeten. Het is een soort wig die achter een landbouwvoertuig of werktuig wordt gemonteerd, zodat de sensor al rijdend door de ondiepe ondergrond (5 a 20 cm diepte) wordt gekliefd. Door deze wijze van monteren worden de metingen on-the-go uitgevoerd. Dat wil zeggen dat de metingen worden uitgevoerd terwijl de boer een grondbewerking uitvoert. Dit heeft als voordeel dat geen extra tijd nodig is om de metingen uit te voeren.

De weerstand die de sensor ondervindt om door de bodem heen te klieven wordt continu geregistreerd in combinatie met de x-, y-, en z-coördinaten. Het levert een vlakdekkende dataset op van de ondiepe ondergrond van de mechanische vervormbaarheid van de ondergrond. Deze parameter is afhankelijk van meerdere bodemparameters, zoals bijvoorbeeld textuur, vochtgehalte of bodemsamenstelling.

De mate van bodemverdichting is niet direct af te leiden uit de metingen. Wel kunnen contourkaarten met meetresultaten een bijdrage geven aan het inzicht in ruimtelijke variaties in de bodemsamenstelling of fysieke omstandigheden. Samen met andere metingen kan dit inzicht een bijdrage leveren aan het CSM. Vooral omdat de metingen relatief goedkoop kunnen worden uitgevoerd (on-the-go) is de toepassing het overwegen waard.

Gamma-ray-sensor

Met deze techniek wordt de van nature aanwezige radioactiviteit van de toplaag van de bodem gemeten. Een sensorsysteem met detector wordt achter een landbouwvoertuig gemonteerd vlak boven maaiveldniveau. De metingen worden on-the-go uitgevoerd; dat wil zeggen dat de metingen in combinatie met de registratie van x-, y-, en z-coördinaten worden uitgevoerd terwijl de boer een grondbewerking uitvoert. Dit heeft als voordeel dat het nagenoeg geen extra tijd kost om de metingen uit te voeren.

Uit de radioactieve elementen kan informatie over de bodem/sedimentsamenstelling worden afgeleid zoals fracties minerale delen, bodemtype of mineraalgebonden verontreiniging of nutriënten. De mate van bodemverdichting is niet direct af te leiden uit de metingen (let op de diepte waarop deze voor komt en de diepte waarop de sensor is afgesteld). Wel kunnen contourkaarten met meetresultaten mogelijk een bijdrage geven aan het inzicht in ruimtelijke variaties in de bodemsamenstelling. Samen met andere metingen kan dit inzicht een bijdrage leveren aan het CSM. Vooral

omdat de metingen relatief goedkoop kunnen worden uitgevoerd (on-the-go) is de toepassing het overwegen waard.

Elektrische weerstandsmetingen

Deze techniek meet de schijnbare elektrische (galvanische) bodemweerstand met elektroden die in de bodem gestoken of door de bodem getrokken worden. Er zijn in de markt verschillende systemen verkrijgbaar. Voor grotere gebieden zijn systemen te krijgen die achter een landbouwvoertuig gemonteerd kunnen worden. Zo worden al rijdend de metingen uitgevoerd.

De variatie elektrische weerstand kan een maat zijn voor ruimtelijke veranderingen in vochtgehalte, maar ook voor veranderingen in klei- of zoutgehalte. Het vochtgehalte is een gidsparameter voor verdichting. Verschillen in vochtgehalte kunnen daarom duiden op verschillen in verdichting.

Elektromagnetische metingen

Deze techniek meet de schijnbare elektrische bodemweerstand door met een zendspoel een elektromagnetisch veld in de bodem te sturen. Met een ontvangspoel wordt op korte afstand dit veld geregistreerd. De verschillen tussen deze twee velden geeft informatie over de elektrische geleidbaarheid van de ondergrond.

Er zijn in de markt verschillende systemen verkrijgbaar. Voor grotere gebieden zijn systemen te krijgen die als on-the-go sensor achter een landbouwvoertuig of in een helikopter (drone is nog experimenteel) gemonteerd worden. Zo worden al rijdend of vliegend de metingen uitgevoerd.

De resultaten worden in een contourkaart weergegeven en geven een kwalitatief inzicht in de ruimtelijke variaties in vocht-, zout- en luchtgehalte. Het vocht- en luchtgehalte is een gidsparameter voor verdichting. Verschillen in vochtgehalte kunnen duiden op verschillen in verdichting.

Een praktisch verschil tussen de elektromagnetische metingen en de elektrische weerstandsmetingen is de dieptegevoeligheid van de metingen. Bij elektrische weerstandsmetingen neemt de gevoeligheid af met de diepte, terwijl bij elektromagnetische metingen de dieptegevoeligheid is in te stellen door opstelling van de meespoelen. Beide technieken hebben in theorie een dieptegevoeligheid die tot meerdere meters (zelfs 10-tallen meters) kan reiken. Voor de toepassing van bodemverdichting is een meetopstelling nodig die speciaal op de bovenste meter is afgestemd.

Grondradar

Grondradar is een techniek waarbij een soort 'röntgenfoto' van de ondergrond gemaakt wordt. Een elektromagnetische golf wordt met een radarantenne de grond ingestuurd. Bij abrupte diëlektrische contrasten in de ondergrond (zoals scheidingen van bodemlagen, objecten e.d.) zal de golf gereflecteerd worden. Door deze reflecties te meten kan een profiel met reflectoren, lagen met veranderingen in bodemsamenstelling, worden gemaakt.

Er zijn in de markt verschillende systemen en antennes verkrijgbaar die voornamelijk het dieptebezoek en oplossend vermogen van de metingen bepalen. De radar kan achter een landbouwvoertuig worden gemonteerd. Zo worden al rijdend de metingen uitgevoerd.

Door een serie metingen in een lijn over het maaiveld uit te voeren wordt een radargram ('röntgenfoto' van de ondergrond in dwarsdoorsnede) verkregen.

Deze techniek meet overgangen in de bodem en kan daardoor onder andere overgangen in bulkdichtheid en porievolumen detecteren. Verschillen in bulkdichtheid, zonder dat sprake is van veranderingen in andere parameters, kunnen duiden op verschillen in verdichting. De toepasbaarheid van radar voor verdichting staat niet op voorhand vast. Pilotmetingen vooraf en – als de toepasbaarheid is aangetoond – goede ijkmetingen zijn vereist.

Remote sensing: RGB-fotografie en NIR

Vanuit de ruimte (satelliet) of lucht (vliegtuig of drone) worden verticale opnamen gemaakt van het land en het gewas. Voor de opnamen worden camera's gebruikt die een breed lichtspectrum detecteren (zowel zichtbaar licht als infrarood en NIR). De metingen worden met een computer verwerkt tot luchtfoto's en geven - afhankelijk van de gebruikte digitale verwerkingstechniek - informatie over bijvoorbeeld het organische-stofgehalte van de bodem, de biomassa aan gewas (per oppervlakte-eenheid), plasvorming, insporing, en temperatuur van de bodem of gewassen.

Met deze parameters – al dan niet gecombineerd met andere informatie – kan een beeld worden verkregen van verschillen binnen een perceel of gebied, die kunnen duiden op bodemverdichting.

Remote sensing: passieve microgolven-radiometrie

Vanuit de ruimte (satelliet) worden verticale opnamen gemaakt van het land. Voor de opnamen worden sensoren gebruikt die camera's gebruikt die natuurlijke micro-golfstraling meten. De aard van de straling wordt beïnvloed door de eigenschappen van de bodem. Door deze met een computer te verwerken tot luchtfoto's kan het bodemvochtgehalte en de bodemdichtheid in het gemeten gebied worden aangegeven.

Met deze metingen kan – al dan niet gecombineerd met andere informatie – een beeld worden verkregen van verschillen binnen een perceel of gebied, die kunnen duiden op bodemverdichting. Dezelfde metingen worden periodiek in een gebied herhaald; immers de satelliet vliegt geregeld over waarbij de sensoren continue de microgolfstraling van het maaiveld meten. Deze metingen zijn daarmee beschikbaar zonder dat eerst een onderzoek in gang dient te worden gezet, goed te gebruiken om veranderingen in de tijd te registreren (monitoring) en zeer geschikt voor onderzoek in grote gebieden.

4.2.2 Directe meting van bodemverdichting

In deze paragraaf zijn voorbeelden gegeven van directe (destructieve) puntenmetingen gegeven om de mate van bodemverdichting vast te stellen.

Penetrometer

Een penetrometer (penetrograaf) is een draagbaar apparaat. In het veld kan in situ de indringingsweerstand van de bodem worden bepaald tot een diepte van maximaal 1 meter. Voor de meting wordt met de hand een conus in de grond gedreven. Met een druksensor wordt de indringingsweerstand gemeten in MPa. Afhankelijk van het type apparaat wordt per diepte de weerstand op een drukmeter afgelezen of kunnen de meetwaarden digitaal worden uitgelezen en in een dieptedruk-grafiek worden weergegeven.

Bij hoge of lage indringingsweerstand van de bodem, kan een bredere of smallere conus worden gebruikt. Hiermee kan optimaal gebruik worden gemaakt van de nauwkeurigheid van de drukmeter.

De meting wordt enkele malen herhaald om een reproduceerbaar resultaat te verkrijgen. Mede hierdoor is de meting relatief tijdsintensief.

De meetwaarden zijn niet 1-1 te vertalen naar mate van verdichting. Hiervoor is bijvoorbeeld ook informatie van het vochtgehalte van de bodem nodig.

Laboratoriummetingen

Voor laboratoriumonderzoek naar verdichting zijn ongestoorde bodemonsters nodig. Deze worden in het veld genomen met bijvoorbeeld een kopeckyring. Van een dergelijk ongestoord monster kan volgens verschillende standaards de bulkdichtheid worden bepaald. De bulkdichtheid wordt uitgedrukt in gr/cm^3 .

Afhankelijk van het type bodem en het kleigehalte kan met deze waarde de mate van verdichting worden bepaald.

Proefkuil

Afwijkingen in bodemstructuur, een aanwijzing voor verdichting, zijn veelal het beste zichtbaar in een profielkuil. Dit is een kuil van ten minste 50 cm diepte met ten minste één rechte, verticale wand. In de wand van een proefkuil kan gedetailleerd de aanwezigheid, diepte en dikte van de verdichting visueel waargenomen worden. Ook kunnen mogelijk aanwijzingen voor het ontstaan van de verdichting, van belang voor het CSM, worden verkregen. Er is een ervaren bodemkundige nodig om het bodemprofiel ter plaatse te beoordelen. Uiteraard is het veel werk om een dergelijke kuil te graven. Het is daarom een zeer arbeidsintensieve meetmethode die bij onderzoek op grote schaal vanwege bijvoorbeeld kosten, doorlooptijd en hinder minder geschikt is voor het in kaart brengen van bodemverdichting.

4.3 Mogelijke onderzoeksapprokken

In de voorgaande paragraaf zijn verschillende technieken besproken waarmee bodemverdichting (indirect) gemeten kan worden. Door deze technieken te combineren kan een groot gebied effectief en efficiënt onderzocht worden. Omdat hier nog weinig ervaring mee is, is de onderzoeksapprok zoals uitgewerkt in deze paragraaf nog niet gevalideerd en ook nog niet helemaal uitgekristalliseerd. Als meer ervaring is opgedaan op dit terrein, kan deze paragraaf op basis daarvan aangepast of verder geconcretiseerd worden.

Op basis van de huidige stand der techniek vormen de volgende onderzoekstappen de meest geëigende aanpak van een grootschalig gebiedsdekkend onderzoek naar verdichting (zie ook tabel 4.1 en de opsomming van algemene aspecten bij de uitwerking van het CSM in § 3.3.2):

- verzamelen basisinformatie over de mogelijk verdichte locaties (bodemkaart, visuele opname div. parameters, gebruikersinformatie, productiegegevens): kunnen de waargenomen verschijnselen inderdaad het gevolg zijn van verdichting of speelt hier iets anders? Verwerk deze informatie in een CSM en toets of de onderzoeksvraag op basis van de zo verkregen inzichten moet worden bijgesteld;
- screening op mogelijke verdichtingslocaties met een techniek vanuit de lucht (drone, vliegtuig, satelliet);
- ondersteunende lijndeekkende metingen;
- verificatiemetingen of kalibratie met een directe meting van de bodemverdichting;
- integratie van alle data in het CSM.

Deze paragraaf geeft samen met de techniek sheets (zie bijlage 1) op basis van de laatste inzichten de mogelijke invullingen van een onderzoekstrategie: de toe te passen specifieke techniek, onderzoeksinspanning en de bandbreedte hierin zijn afhankelijk van variabelen in het CSM en specifieke kaders die per geval kunnen afwijken.

Gezien de huidige stand der techniek naar verdichting is het raadzaam om per onderzoeksopgave eerst een pilot uit te voeren. Op basis daarvan kan het onderzoek voor dit gebied vervolgens meer specifiek worden ingevuld en opgeschaald naar het gehele onderzoeksgebied.

Met deze pilot kan ook inzicht worden verkregen in de heterogeniteit van de bodem en de representativiteit van de metingen. Met dit inzicht kan ook worden onderbouwd hoe metingen geïnterpooleerd kunnen worden. Dat houdt in dat de ruimtelijke variaties van verschillende fenomenen in de ondergrond bekend zijn, een daarbij passende interpolatie is toegepast en onzekerheden in de toegepaste interpolatie zijn aangegeven.

Tabel 4.1 Handvatten voor opstellen onderzoekstrategie

	Regionaal	Perceel (extensief)	Perceel (intensief)
Basisinformatie	Bodemkaart, gegevens van gebruikers: rijdbaarheid, wateroverlast, productiegegevens (zie § 3.3.2 en 3.3.3)		
	<i>Toelichting. Informatie uit andere bronnen dan actieve metingen. Ter verfijning van het CSM en ter ondersteuning van de interpretatie van data.</i>		
Initiële techniek	Satelliet - VIS/NIR	Airborn (drone / vliegtuig) - VIS/NIR - DTM	On-the-go-sensoren 1- Meting vanaf speciaal hiervoor ingericht voertuig (bijv. quad) 2- Sensoren op landbouwvoertuig
Typisch toegepaste herhalingsfrequentie van metingen	Intensieve monitoring o.b.v. maandelijks beschikbare nieuwe dataset en automatische verwerking.	Eenmalige opname of monitoring met een frequentie van bijv. 1x/jaar.	1- Incidentele opname voor gericht onderzoek 2- Semipermanente metingen

	Regionaal	Perceel (extensief)	Perceel (intensief)
Typisch toepassing	Globale inventarisatie of monitoring van meerdere percelen of gebied	Screening op perceels-niveau om progressie (toename verdichting of effectiviteit maatregelen) te monitoren of onderzoek op perceels- of deelgebiedsniveau in te vullen.	Gedetailleerde opname van bodemeigenschappen. Planning van: - on site -/ off site-verificatiemetingen - mitigerende maatregelen
Verificatie- of kalibratiemetingen	Uitvoering van directe metingen van bodemverdichting (puntmetingen, paragraaf 4.2.2)		
Verwerking en interpretatie gegevens	Integrale interpretatie waarbij oorzaak (welk(e) bodemproces(sen) is (zijn) aan de orde) en gevolg (meetdata) aan elkaar worden gekoppeld.		
Output	Gevalideerd CSM op gewenst schaalniveau		

4.4 Pilot

Een pilot kan ingezet worden om te testen in hoeverre de gekozen onderzoekstechniek ook feitelijk toepasbaar is voor het onderzoeksgebied. Een pilot kan ook inhouden dat de toepassingswijze van een techniek in het veld eerst op kleine schaal wordt uitgeprobeerd. Denk hierbij bijvoorbeeld aan proefondervindelijk zoeken naar de meest geschikte antenne voor een grondradar, of het voorverkennen van de bodemheterogeniteit voor het kiezen van een geschikte meetafstand van een meetgrid.

Een pilot is de eerste stap in een iteratieve onderzoeksaanpak (zie ook § 3.3.2). Een pilot is met name nuttig als het om een groot gebied of een relatief nieuwe onderzoeksaanpak gaat. Zowel opdrachtgever als opdrachtnemer willen dan graag zeker weten dat een bepaalde onderzoeksstrategie en -aanpak voldoet en ze zullen dit op een deel van de locatie willen testen voordat het full scale wordt toegepast.

Ook in het geval van een ontbrekend toetsingskader kan het zinvol zijn een pilot toe te passen. Op basis van de resultaten van de pilot kan het toetsingskader gespecificeerd worden, in overleg met alle betrokken actoren. Een toetsingskader is nodig als het onderzoek naar verdichting gericht is op het nemen van besluiten en het formuleren van bepaalde acties, bijvoorbeeld besluiten tot het nemen van curatieve maatregelen. Als de combinatie onderzoeksaanpak – toetsingskader voorafgaand aan de full scale-uitvoering is doorgesproken met de betrokken actoren, draagt dit bij aan draagvlak voor later te nemen besluiten en uit te werken plannen voor maatregelen.

Indien de opdrachtgever gebruik wil maken van een veldpilot, kan hij de offerte-aanvraag voor de pilot in een separaat traject uitwerken, conform de stappen van een 'reguliere' uitvraag (zie hoofdstuk 3). De uitvraag heeft in dat geval een relatief beperkte omvang. Indien van toepassing moet expliciet worden vermeld dat er nog geen toetsingskader is en dat dit op basis van de uitgevraagde pilot wordt bepaald. Op basis van de pilot worden de technisch haalbare mogelijkheden, de meetbaarheid, de presentatievormen en toetsbaarheid bepaald. De onderzoeksstrategie wordt op basis daarvan door de opdrachtgever bijgesteld. Er worden een meetplan of monitoringsplan en, indien van toepassing, een toetsingskader opgesteld. Deze worden meegenomen in de uitvraag voor het full scale-onderzoek.

5 Opstellen uitvraag

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk biedt handvatten voor het opstellen van een zo volledig mogelijke uitvraag. Er wordt ingegaan op de volgende onderdelen:

- aan te leveren informatie bij de uitvraag;
- verwachte elementen in offertes naar aanleiding van uitvraag;
- bewijslast; eventueel opnemen van een pilot.

Het verdient aanbeveling om samen met de aanbieder(s) te controleren of de kaders voor het onderzoek en de onderzoeksstrategie duidelijk zijn. In de praktijk blijkt namelijk dat hiermee eventuele misverstanden op voorhand kunnen worden voorkomen en direct kunnen worden meegenomen in een onderzoeksvoorstel door een techniekaanbieder.

5.2 Aan te leveren informatie bij de uitvraag

Tabel 1 geeft een overzicht van de randvoorwaarden en variabelen die opdrachtgevers aan de aanbieders kunnen communiceren (zoals eisen, gebiedskenmerken wens omgeving). De betreffende informatie is verzameld in het kader van hoofdstuk 3 (met name § 3.4) en wellicht nog bijgeschaafd naar aanleiding van hoofdstuk 4.

Tabel 5.1 Aan te leveren informatie bij een uitvraag

Randvoorwaarde/ variabele	Toelichting
Doel onderzoek	Zie § 3.2.
Afbakening gebied	Welk gebied (eventueel met deelgebieden) moet worden onderzocht? Wat is het bodemgebruik? Alleen landbouwgebied onderzoeken of ook tussenliggende gebieden met ander gebruik? Kaart toevoegen.
Betrokken actoren	Zie hoofdstuk 2 en § 3.3.2
Onderzoeksplan	Bestaat er al een plan waaraan moet worden voldaan wat betreft strategie? Is het betreffende gebied al eerder onderzocht en moet het nieuwe onderzoek hieraan gerelateerd kunnen worden?
Toetsingskader	Zie § 3.2.
Conceptual Site Model	Zie § 3.3.2.
Onderzoeksvraag	Zie § 3.5.
Locatie- en gebiedskenmerken	Zie § 3.3.3.
Visualisatie/interpretatie output	Zie § 5.3.
Gunningscriteria	Waar wordt de offerte op beoordeeld? (Dit is afhankelijk van aanbestedingstraject; dit valt buiten de scope van deze handreiking.)
Planning	Zie § 3.3.5.
Onderzoeksstrategie	Zie § 3.4.
Onderzoeksbudget	Wil de opdrachtgever een maximaal budget voor uitvoering van het onderzoek meegeven in de offerte-aanvraag?

5.3 Eisen aan de aan te vragen offertes

De opdrachtgever beschrijft in zijn uitvraag welke inhoudelijke elementen⁴ de offerte ten minste dient te bevatten. Hieronder volgen enkele voorbeelden van elementen:

- welke techniek of combinatie van gebiedsdekkende technieken wordt ingezet inclusief onderbouwing van de keuze. Zie hiervoor § 4.2;
- welk meetregime wordt gevolgd (meetinspanning) inclusief onderbouwing in relatie tot de onderzoeksstrategie (heterogeniteit en betrouwbaarheid). Zie hiervoor § 3.4;
- welke verificatiemetingen zijn voorzien. Zie § 4.3 voor voorbeelden van toepasbare technieken;
- mate van vertaalbaarheid van meetgegevens (gidsparameters in combinatie met verificatiemetingen) naar het onderzoeksdoel en, indien van toepassing, het toetsingskader (zie ook § 5.4: Bewijslast);
- hoe wordt omgegaan met beperkende randvoorwaarden en welke gevolgen hebben deze voor het onderzoek;
- geef aan dat conclusies worden getrokken op het gegeven 'toetsingskaderniveau'. Zie hiervoor hoofdstuk 6;
- geef een indruk van de wijze van presentatie van de resultaten. Denk hierbij aan kaarten met meetwaarden, contourkaarten, meetprofielen;
- planning van de uitvoering van de metingen inclusief een eventuele pilot en mogelijkheden om op basis van deze pilot het onderzoek aan te passen.

5.4 Bewijslast indiener offerte

De offerte moet op verifieerbare uitgangspunten zijn gebaseerd.

Bij de beoordeling van de inhoudelijke elementen van de offertes is het van belang om niet alleen af te gaan op omschrijvingen hoe de werkzaamheden worden uitgevoerd. Het is van belang om de offertes ook op basis van verifieerbare uitvoeringsinformatie te beoordelen. Dit wordt hieronder toelicht.

1. Competentie: Opdrachtnemers kunnen op verschillende manieren aantonen dat zij in staat zijn om met de door hen aangeboden metingen en werkzaamheden de juiste gegevens te verzamelen om antwoord te geven op de onderzoeksvraag. Dit zijn:
 - referentieprojecten;
 - ijk-/referentiemetingen tijdens uitvoering;
 - overleg relevante literatuur als bewijs;
 - pilot uitvoeren voordat full scale wordt gemeten (zie hieronder);
 - hebben onafhankelijke derden de toepasbaarheid bevestigd?
2. De opdrachtnemer dient in de offerte te onderbouwen hoe hij uitsluitel geeft of een gemeten waarde door verdichting of een ander proces is veroorzaakt. Toelichting: Bodemverdichting kan op verschillende (bodem)parameters effect hebben (zie CSM in § 3.3.2). Anderzijds duiden (veranderingen in) deze parameters niet noodzakelijkerwijs op bodemverdichting. Dat gegeven vergt bij de verwerking en interpretatie van de nieuw verkregen data extra aandacht, zodat beter kan worden onderbouwd in welke mate de gemeten waarde door verdichting of andere processen is veroorzaakt.
3. Bewezen techniek of niet.
Niet alle onderzoekstechnieken zijn in gelijke mate geschikt voor onderzoek naar verdichting. Per voorgestelde techniek dient daarom te worden aangegeven in welke mate deze techniek toepasbaar is voor de specifieke situatie en vraagstelling.

⁴ Deze handreiking beperkt zich tot inhoudelijke elementen voor het onderzoek. Keuzes die betrekking hebben op de manier van aanbesteden blijven buiten beschouwing.



Niet-verdichte bodem

5.5 Eisen aan de inhoud van het onderzoeksrapport

Voor de start van het onderzoek moet er duidelijkheid zijn over de scope en kaders van het uit te voeren onderzoek. Deze vormen de basis waarop het rapport wordt gebouwd. Als hierin wijzigingen zijn opgetreden worden deze in het rapport besproken inclusief de consequenties voor de beoogde resultaten.

Het onderzoeksrapport zal dan moeten eindigen met conclusies en aanbevelingen in de trant van: 'In het gebied is sprake van voortschrijdende verdichting. Hierdoor zal in de toekomst steeds vaker sprake zijn van verhoogde piekafvoeren. Aanbevolen wordt om enerzijds de pompcapaciteit van de gemalen te verhogen, anderzijds met de agrariërs in het gebied in gesprek te gaan om te bekijken of verdere verdichting zo veel mogelijk voorkomen kan worden'. Natuurlijk kan de opdrachtgever ervoor kiezen deze conclusies zelf te trekken.

Onderdelen van de rapportage zijn in ieder geval (niet-uitputtende opsomming):

- vraagstelling;
- uitgangspunten voor het onderzoek, waaronder eisen en wensen van betrokken actoren en eisen aan het onderzoeksresultaat;
- basisinformatie, al dan niet aangereikt door de opdrachtgever, of door de opdrachtnemer verzamelde informatie. De informatie beslaat in ieder geval de punten die (voor zover van toepassing) in § 3.3 zijn vermeld.
- aanvankelijk CSM en hypothese (zie voor inhoudelijke punten § 3.2.2);
- gehanteerde onderzoeks aanpak op basis van de onderzoekshypothese;
- uitgevoerd onderzoek, inclusief tussenstappen, bijstellingen en achtergronden bij de bijstellingen;
- onderzoeksresultaten inclusief de ruwe meetdata, metadata, interpretatie.
Het kan voor een gebiedsbeheerder van belang zijn om alle originele (digitale) meetdata als zodanig in zijn eigen dossier te bewaren voor eventuele later gebruik of herinterpretatie. Voor zover relevant wordt hierbij de gegevensstandaard SIKB 0101 gehanteerd. Voor andere data wordt een van te voren afgesproken uitwisselingsformat gehanteerd.
De wijze van visualiseren kan bestaan uit themakaarten, profielen, foto's etc.
- onderzoeksconclusies, indien van toepassing inclusief toetsing aan het toetsingskader en beschrijving van kennishiaten of onzekerheden in het onderzoek;
- eventueel advies voor vervolgonderzoek (als volgende stap in een monitoring of om het uitgevoerde onderzoek op een hoger niveau te krijgen).

6 Besluitvorming op basis van onderzoeksresultaten

Na afronding van het onderzoek zal besluitvorming plaatsvinden over de resultaten van het onderzoek en over de vraag of dit leidt tot wijziging van beleid of uitvoeringsacties.

Veelal zal de aanleiding voor het onderzoek liggen in de wens agrariërs te helpen om de bodem van hun gronden beter te beheren en zo hun opbrengsten voor de lange termijn te borgen en in de wens om doeltreffend waterbeheer te voeren in een bepaald gebied. Zie voor de mogelijke aanleidingen van onderzoek naar verdichting § 3.2. De onderzoeksresultaten ten minste een bijdrage moeten leveren aan de oplossing van het probleem.

De onderzoeksresultaten kunnen leiden tot vervolgacties door agrariërs. Zie mogelijke maatregelen tegen verdichting in onderstaand kader. Ook kunnen overheden de resultaten gebruiken voor de onderbouwing van stimuleringsbeleid.

Maatregelen tegen verdichting

Onderzoek naar verdichting staat relatief kort op de agenda. Ook is nog niet duidelijk is wat de meest effectieve aanpak is om bodemverdichting aan te pakken. Onderstaand wordt een overzicht gegeven van veelgenoemde maatregelen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in preventieve, reactieve en curatieve maatregelen.

Preventief

- lagere bandenspanning / lagere as-last / brede band / rupsband;
- preventieve aanpassingen bij grondverzet;
- rijden over vaste banen (controlled traffic) (NB: het probleem met deze banden is dat je met nattere omstandigheden toch het land op kunt. Dan is de bodem juist extra gevoelig voor verdichting. Belangrijk is dus vooral: zo licht mogelijke voertuigen (trend is juist: steeds zwaardere machines));
- overstappen op het gebruik van lichte robots voor alle veldwerkzaamheden van grondbewerking tot de oogst; verminderen betreden veld;
- drukwisselsystemen toepassen;
- niet-kerende grondbewerking toepassen;
- niet rijden in ploegvoor;
- meerjarige diepwortellende gewassen toepassen;
- vermijden van het gebruik van kunstmest
- toepassen van precisiebemesting met circulaire meststoffen;
- niet berijden bij natte omstandigheden, eventueel hiertoe de drainage verbeteren.

Curatief

- ploegen (beperkte mate van oplossing). (NB: Geploegde velden zijn extra gevoelig voor hernieuwde verdichting);
- reparatie van verdichting door grondverzet;
- precisiebeheer, anders ploegen, bewateren, hoge datadichtheid;
- aanvoer organisch materiaal;
- verruimde rotatie (meer variatie en niet te veel rooigewassen);
- vergroten van de populatie regenwormen om de bioturbatie te stimuleren;
- aanpassen gewaskeuze (kunnen wortels in verdichte zones penetreren?). Diepwortelende planten minimaal enkele jaren achtereen (3 à 4 jaar) toepassen om effect te laten hebben. Experimenten met sorghum (kafferkoren);
- Trend: natuurlijk herstel (in combinatie met preventieve maatregelen) gericht op de laag vlak onder de bouwvoor. Natuurlijk herstel is echter moeizaam, onvolledig of niet aanwezig.

Bijlage 1. Technieksheets gebiedsdekkende elektronische meet-technieken: toepasbaarheid voor onderzoek bodemverdichting

In deze bijlage vindt u een beschrijving van gebiedsdekkende elektronische meettechnieken. Deze technieken hebben als kenmerk dat ze indirecte informatie opleveren van de bodemverdichting (gidsparementen) en veelal relatief goed toepasbaar zijn voor het verkrijgen van informatie over deze parameters die een groter gebied. Denk bij dit laatste aan het meten van een geheel perceel, gebied of provincie.

De technieksheet geeft de basisinformatie om als gebruiker van deze handreiking een eerste selectie te kunnen maken van welke technieken mogelijk voor de onderzoeksvraag geschikt zijn en om te kunnen beoordelen of in een offerte voor het uitvoeren van bodemonderzoek naar verdichting de voorgestelde technieken te kunnen beoordelen op een juiste toepassing.

Het betreft de volgende technieken:

1. mechanische vervormingsweerstandssensor
2. gamma-ray-sensor
3. elektrische weerstandssensor
4. elektrische weerstandsmetingen (ERT)
5. elektromagnetische metingen (FDEM-sensor)
6. grondradar
7. remote sensing: RGB-fotografie
8. remote sensing: NIR
9. remote sensing: Passieve microgolven radiometrie
10. penetrometer
11. zand-/grindvervangning
12. steekring-methode
13. nucleaire methode

Opmerking:

De toepassing van de meeste van de genoemde technieken voor onderzoek naar bodemverdichting is nog relatief beperkt. Een aantal aspecten waarop deze technieken is beoordeeld is nog niet bekend of onderwerp van onderzoek.

Techniek	1 - Mechanische vervormingsweerstandsensor			
Variant (indien van toepassing)	On-the-go-sensor.			
Algemene techniekbeschrijving	Met een sensor wordt al rijdend over het veld de mechanische vervorming van het bovenste deel van de bodem gemeten. Het is een soort wig die achter een landbouwvoertuig wordt gemonteerd zodat de sensor al rijdend door de ondiepe ondergrond (5 a 20 cm diepte) wordt gekliefd. Als de sensor aan een landbouwwerktuig wordt gemonteerd, worden de metingen on-the-go uitgevoerd; dat wil zeggen dat de metingen worden uitgevoerd terwijl de boer een grondbewerking uitvoert. Dit heeft als voordeel dat nagenoeg geen extra tijd nodig is om de metingen uit te voeren.			
Link naar Bodemrichtlijn	n.v.t.			
Te meten gidsparameter	Mechanische weerstand tegen vervorming. Deze parameter is kan afhankelijk zijn van meerdere bodemparameters als bijvoorbeeld textuur, vochtgehalte of bodemsamenstelling.			
Directe of indirecte meting	Indirect. Mate van mechanische weerstand heeft niet in alle gevallen een directe relatie met mate van verdichting.			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Mate van weerstand van de bodem tegen mechanische vervorming. NB: Naast bodemverdichting kan de weerstand ook afhankelijk zijn van eigenschappen als de bodemsamenstelling, vochtgehalte, textuur.			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Beproefde techniek. In buitenland commercieel beschikbaar apparaat.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Dieptebereik	Ca. 30 cm.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	Alleen in als sprake is van hoge mate van verdichting in de top-laag is deze techniek onderscheidend.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Toepasbaarheid	Veranderingen in verdichting resulteren niet altijd in meetbare veranderingen in weerstand.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Aanbeveling voor toepassing	Ter ondersteuning van andersoortige metingen.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Praktische punten van belang voor toepassing	-	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.

Techniek	2 - Gamma-ray-sensor			
Variant (indien van toepassing)	Actief: met stralingsbron en sensor. Passief: met alleen sensor voor registratie natuurlijke straling.			
Algemene techniekbeschrijving	Een sensorsysteem met detector wordt achter een landbouwvoertuig gemonteerd vlak boven maaiveldniveau. De metingen on-the-go uitgevoerd; dat wil zeggen dat de metingen worden uitgevoerd terwijl de boer een grondbewerking uitvoert. Dit heeft als voordeel dat geen extra tijd nodig is om de metingen uit te voeren. Dit sensorsysteem meet de radioactiviteit in de toplaag van de bodem. Uit de radioactieve elementen kan informatie over de bodem/sedimentsamenstelling worden afgeleid zoals fracties minerale delen, bodemtype of mineraalgebonden verontreiniging of nutriënten.			
Link naar Bodemrichtlijn	https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/gamma-ray-sensor			
Te meten gidsparameter	Mate van straling door radionucliden. De mate van bodemverdichting is niet direct af te leiden uit de metingen (let op de diepte waarop deze voor komt en de diepte waarop de sensor is afgesteld). Wel kunnen contourkaarten met meetresultaten mogelijk een bijdrage geven aan het inzicht in ruimtelijke variaties in de bodemsamenstelling. Samen met andere metingen kan dit inzicht een bijdrage leveren aan het CSM.			
Directe of indirecte meting	Actieve variant: directe meting van de dichtheid. Passieve variant: indirecte meting.			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Actieve variant: bulkdichtheid. Passieve variant: kleigehalte.			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Beproefde techniek.	Experimenteel stadium.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Dieptebereik	Ca. 30 cm.	Experimenteel stadium.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	Met een actieve sensor kan toename in verdichting worden gemeten. Een passieve sensor geeft informatie over bodemsamenstelling, dit geeft risico's op verdichting weer.	Experimenteel stadium.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Toepasbaarheid	-	Experimenteel stadium.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Aanbeveling voor toepassing	Ter ondersteuning van andersoortige metingen.	Experimenteel stadium.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Praktische punten van belang voor toepassing	-	Experimenteel stadium.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.

Techniek	3 - Elektrische weerstandsensor			
Variant (indien van toepassing)	On-the-go-sensor			
Algemene techniekbeschrijving	Deze techniek meet de schijnbare elektrische bodemweerstand met elektroden die in de bodem gestoken of door de bodem getrokken worden en zo de elektrische (galvanische) bodemweerstand meten. Er zijn in de markt verschillende systemen verkrijgbaar. Voor grotere gebieden zijn systemen te krijgen die achter een landbouwvoertuig gemonteerd kunnen worden. Zo worden al rijdend de metingen uitgevoerd.			
Link naar Bodemrichtlijn	https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/elektrische-weerstandsmeting8370			
Te meten gidsparameter	De variatie elektrische weerstand kan een maat zijn voor ruimtelijke veranderingen in vochtgehalte, maar ook voor veranderingen in klei- of zoutgehalte. Het vochtgehalte is een gidsparameter voor verdichting. Verschillen in vochtgehalte kunnen daarom duiden op verschillen in verdichting.			
Directe of indirecte meting	Indirect. De bodemweerstand is afhankelijk van het vochtgehalte, kleigehalte of nutriëntengehalte in de bodem.			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Een verdichte bodem zal leiden tot stagnerend regenwater in de bodemlaag erboven. Het verhoogde vochtgehalte leidt tot een lagere bodemweerstand.			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Beproefde techniek. Toepassing voor bodemverdichting is nieuw. In buitenland commercieel beschikbaar apparaat.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Dieptebereik	Ca. 30 cm.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	De afname van bodemweerstand als gevolg van verdichting kan substantieel zijn.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Toepasbaarheid	De elektrische bodemweerstand is van het vochtgehalte afhankelijk. Daarmee geeft deze methode alleen indirecte aanwijzingen voor verdichting.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Aanbeveling voor toepassing	Ter ondersteuning van andersoortige metingen.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Praktische punten van belang voor toepassing	-	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.

Techniek	4 - Elektrische weerstandsmetingen (ERT)			
Variant (indien van toepassing)	Electric Resistivity Tomography (ERT) ('sleep'-uitvoering)			
Algemene techniekbeschrijving	Een kabel met vier elektroden wordt al rijdend over het land getrokken. Met twee elektroden wordt een elektrische stroom de grond in gestuurd, met twee andere meetelektroden het spanningsverschil gemeten. Dit spanningsverschil geeft aanwijzingen over de gemiddelde elektrische bodemweerstand in een bulkvolume grond onder de elektroden. Laterale verschillen van weerstand geven aanwijzingen over de verschillende bodemeigenschappen.			
Link naar Bodemrichtlijn	https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/elektrische-weerstandsmeting8369			
Te meten gidsparameter	Galvanische bodemweerstand.			
Directe of indirecte meting	Indirect. Bodemweerstand is van meerdere bodemeigenschappen afhankelijk.			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Een verdichte bodem zal leiden tot stagnerend regenwater in de bodemlaag erboven. Het verhoogde vochtgehalte leidt tot een lagere bodemweerstand. De bodemsamenstelling (kleigehalte) zelf kan ook tot verschillen in meetwaarden leiden.			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Beproefde techniek. Toepassing voor bodemverdichting is nieuw. Toepassing voor verdichting in beginfase	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.
Dieptebereik	Afhankelijk van de spoelafstand tot meer dan 1 m.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar,	Niet toepasbaar,
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	De afname van bodemweerstand als gevolg van verdichting kan substantieel zijn.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar,
Toepasbaarheid	Naast verdichting zijn er ook andere aspecten van de bodem die (soms grotere) invloed hebben op de geleidbaarheid.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar,
Aanbeveling voor toepassing	Ter ondersteuning van andersoortige metingen.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar,
Praktische punten van belang voor toepassing	Zorg voor goed contact met de ondergrond. Bij een onregelmatige ondergrond is dit lastig te realiseren.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar.	Niet toepasbaar,

Techniek	5 - Elektromagnetische metingen			
Variant (indien van toepassing)	Frequency Domain Electro Magnetics			
Algemene techniekbeschrijving	Deze techniek meet de schijnbare elektrische bodemweerstand door met een zendspool een elektromagnetisch veld in de bodem te sturen. Met een ontvangstspool wordt op korte afstand dit veld geregistreerd. De verschillen tussen deze twee velden geeft informatie over de elektrische geleidbaarheid van de ondergrond. Er zijn in de markt verschillende systemen verkrijgbaar. Voor grotere gebieden zijn systemen te krijgen die als on-the-go sensor achter een landbouwvoertuig of in een helikopter (drone is nog experimenteel) gemonteerd worden. Zo worden al rijdend of vliegend de metingen uitgevoerd.			
Link naar Bodemrichtlijn	https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/elektromagnetische-metingen-8367			
Te meten gidsparameter	Galvanische bodemweerstand. De resultaten worden in een contourkaart weergegeven en geeft een kwalitatief inzicht in de ruimtelijke variaties in vocht-, zout- en luchtgehalte. Het vocht- en luchtgehalte is een gidsparameter voor verdichting. Verschillen in vochtgehalte kunnen duiden op verschillen in verdichting.			
Directe of indirecte meting	Indirect. Bodemweerstand is van meerdere bodemeigenschappen afhankelijk.			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Een verdichte bodem zal leiden tot stagnerend regenwater in de bodemlaag erboven. Het verhoogde vochtgehalte leidt tot een lagere bodemweerstand. De bodemsamenstelling (kleigehalte) zelf kan ook tot verschillen in meetwaarden leiden.			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Beproefde techniek. Toepassing voor bodemverdichting is nieuw. Toepassing voor verdichting in beginfase.	Niet bekend.	Inzetbaar met helikopter. Toepassing voor verdichting niet bekend.	Niet toepasbaar.
Dieptebereik	Afhankelijk van de spoelafstand tot meer dan 1 m.	Niet bekend.	Zie hierboven.	Niet toepasbaar.
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	De afname van bodemweerstand als gevolg van verdichting kan substantieel zijn.	Niet bekend.	Zie hierboven.	Niet toepasbaar.
Toepasbaarheid	Naast verdichting zijn er ook andere aspecten van de bodem die (soms grotere) invloed hebben op de geleidbaarheid.	Niet bekend.	Zie hierboven.	Niet toepasbaar.
Aanbeveling voor toepassing	Ter ondersteuning van andersoortige metingen.	Niet bekend.	Zie hierboven.	Niet toepasbaar.
Praktische punten van belang voor toepassing	-	Niet bekend.	Zie hierboven.	Niet toepasbaar.

Techniek	6 - Grondradar			
Variant (indien van toepassing)	GPR (Ground Penetrating Radar) Verschillende antennes / frequenties			
Algemene techniekbeschrijving	<p>Grondradar is een techniek waarbij een soort 'röntgenfoto' van de ondergrond gemaakt wordt. Een elektromagnetische golf wordt met een radarantenne de grond ingestuurd. Bij abrupte dielektrische contrasten in de ondergrond (zoals scheidingen van bodemlagen, objecten e.d.) zal de golf gereflecteerd worden. Door deze reflecties te meten kan een profiel met reflectoren, lagen met veranderingen in bodemsamenstelling, worden gemaakt.</p> <p>Er zijn in de markt verschillende systemen en antennes verkrijgbaar die voornamelijk het dieptebereik en oplossend vermogen van de metingen bepalen. De radar kan achter of aan een landbouwvoertuig worden gemonteerd. Zo worden al rijdend de metingen uitgevoerd.</p> <p>Door een serie metingen in een lijn over het maaiveld uit te voeren wordt een radargram ('röntgenfoto' van de ondergrond in dwarsdoorsnede) verkregen.</p>			
Link naar Bodemrichtlijn	https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/grondradar			
Te meten gidsparameter	Reflectietijd in Nanoseconden. Deze wordt met een verwerkingsprogramma op de computer omgerekend naar diepte in meter.			
Directe of indirecte meting	Direct / Indirect Vooral indirecte effecten van verdichting zijn op deze wijze zichtbaar. Directe effecten van verdichting is in uitzonderlijke gevallen zichtbaar.			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Een verdichte bodem zal leiden tot lagen met verschillende dichtheid. Als deze laagovergangen voldoende abrupt gaan leidt dit tot diëlektrische contrasten en daarmee tot met de grondradar meetbare laagovergangen. Naast verdichting zullen ook veranderingen in bodemsamenstelling leiden tot diëlektrische contrasten.			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Beproefde techniek. Toepassing voor bodemverdichting is nieuw. Toepassing voor verdichting in beginfase.	Niet bekend	Niet bekend	Niet toepasbaar
Dieptebereik	Afhankelijk van de spoelafstand tot meer dan 1 m.	Niet bekend	Niet bekend	Niet toepasbaar
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	Deze is afhankelijk van hoe geleidelijk de overgangen tussen verschillende lagen is.	Niet bekend	Niet bekend	Niet toepasbaar
Toepasbaarheid	Naast verdichting zijn er ook andere aspecten van de bodem die (soms grotere) invloed hebben op de geleidbaarheid: vochtgehalte, bodemsamenstelling, poriënvolume.	Niet bekend	Niet bekend	Niet toepasbaar
Aanbeveling voor toepassing	Ter ondersteuning van andersoortige metingen.	Niet bekend	Niet bekend	Niet toepasbaar
Praktische punten van belang voor toepassing	-	Niet bekend	Niet bekend	Niet toepasbaar

Techniek	7 - Remote sensing – RGB-fotografie			
Variant (indien van toepassing)	RGB-fotografie			
Algemene techniekbeschrijving	Vanuit de ruimte (satelliet) of lucht (vliegtuig of drone) worden verticale opnamen gemaakt van het land en het gewas. Voor de opnamen worden camera's gebruikt die een breed licht-spectrum detecteren (zowel zichtbaar licht als infrarood). De metingen worden met een computer verwerkt tot luchtfoto's.			
Link naar Bodemrichtlijn	https://www.bodemrichtlijn.nl/Zoeken?query=remote+sensing (met algemene informatie over remote sensing technieken)			
Te meten gidsparameter	Optische lichtgolven (zichtbaar licht) of infra rood.			
Directe of indirecte meting	Indirect. Alleen enkele indirecte effecten van verdichting zijn op deze wijze zichtbaar.			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Gewaskwaliteit (gewasstress). Mate van insporing van landbouwvoertuigen. Plasvorming.			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Theoretisch toepasbaar maar toepassing vindt niet plaats i.v.m. inefficiëntie.	Beproefde techniek. Toepassing voor verdichting in beginfase.	Beproefde techniek. Toepassing voor verdichting in beginfase.	Theoretisch toepasbaar maar toepassing vindt niet plaats i.v.m. onvoldoende onderscheidend vermogen.
Dieptebereik	Meet alleen effecten aan de toplaag	idem	idem	idem
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)		Alleen indirecte informatie over mogelijke verdichting	Alleen indirecte informatie over mogelijke verdichting	-
Toepasbaarheid	In praktijk lastig toepasbaar vanwege klein schaalniveau (puntwaarnemingen)	Alleen voor visueel zichtbare zaken	Alleen voor visueel zichtbare zaken	Schaalniveau kan te grof zijn voor visuele zaken
Aanbeveling voor toepassing	-	Toepassing op perceelsniveau	Toepassing op gebiedsniveau	-
Praktische punten van belang voor toepassing	-	Hoge begroeiing/ bebouwing of objecten op maaiveld belemmeren zicht waarnemingen van maaiveld. Restrictie voor vluchten (no fly zones) Weersinvloeden bepalen kwaliteit	Hoge begroeiing/ bebouwing of objecten op maaiveld belemmeren zicht waarnemingen van maaiveld.	-

Techniek	8 - Remote sensing - NIR			
Variant (indien van toepassing)	NIR			
Algemene techniekbeschrijving	Vanuit de ruimte (satelliet) worden verticale opnamen gemaakt van het land en het gewas. Voor de opnamen worden sensoren gebruikt die het NIR spectrum registreren. De metingen worden met een computer verwerkt tot luchtfoto's			
Link naar Bodemrichtlijn	https://www.bodemrichtlijn.nl/Zoeken?query=remote+sensing (met algemene informatie over remote sensing technieken)			
Te meten gidsparameter	NIR-golven.			
Directe of indirecte meting	Indirect. Alleen enkele indirecte effecten van verdichting zijn op deze wijze zichtbaar.			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Organische-stofgehalte. Biomassa/onkruiddruk Plasvorming Temperatuur			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Theoretisch toepasbaar maar toepassing vindt niet plaats i.v.m. inefficiëntie.	Beproefde techniek Toepassing voor verdichting in beginfase	Beproefde techniek Toepassing voor verdichting in beginfase	Beproefde techniek Toepassing voor verdichting in beginfase
Dieptebereik	Toplaag	idem	idem	idem
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)		Alleen indirecte informatie over mogelijke verdichting	Alleen indirecte informatie over mogelijke verdichting	
Toepasbaarheid		Alleen voor oppervlakkig waarneembare fenomenen	idem	idem
Aanbeveling voor toepassing		Toepassing op perceelniveau	Toepassing op gebiedsniveau	Toepassing op gebiedsniveau Gebiedsmonitoring
Praktische punten van belang voor toepassing		Restrictie voor vluchten (no fly zones) Weersinvloeden bepalen kwaliteit	p.m.	Schaalniveau kan te grof zijn

Techniek	9 - Remote sensing – Passieve microgolven-radiometrie			
Variant (indien van toepassing)	Passieve microgolven-radiometrie.			
Algemene techniekbeschrijving	Vanuit de ruimte (satelliet) worden verticale opnamen gemaakt van het land. Voor de opnamen worden sensoren gebruikt die camera's gebruikt die micro-golfstraling meten. De aard van de straling wordt beïnvloed door de eigenschappen van de bodem. Door de met een computer te verwerken tot luchtfoto's kan het bodemvochtgehalte en de bodemdichtheid in het gemeten gebied worden aangegeven.			
Link naar Bodemrichtlijn	https://www.bodemrichtlijn.nl/Zoeken?query=remote+sensing (met algemene informatie over remote sensing technieken)			
Te meten gidsparameter	Microgolven.			
Directe of indirecte meting	Direct. Alleen enkele indirecte effecten van verdichting zijn op deze wijze zichtbaar.			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Bodemvochtgehalte, dichtheid.			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Beproefde techniek. Toepassing voor verdichting in beginfase.	In ontwikkelingsfase	Operationeel	Operationeel
Dieptebereik	Toplaag (enkele centimeters) *)	idem	idem	idem
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	1x1 m		5x5 m tot 20x20 m	50x50 km
Toepasbaarheid	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.
Aanbeveling voor toepassing	Toepassing op perceelsniveau of kleinschaliger.	Toepassing op perceelsniveau	Toepassing op gebiedsniveau	Toepassing op globaal niveau
Praktische punten van belang voor toepassing	1 ha / uur		Meetsnelheid van 50 km ² /uur	

*) De op deze wijze verkregen bodemvochtwaarnemingen hebben een correlatie met de grondwaterstanden tot ongeveer 1 meter diepte

Techniek	10 - Penetrometer / penetrologger			
Variant (indien van toepassing)	Digitaal/analooq.			
Algemene techniekbeschrijving	<p>Een penetrometer (penetrograaf) is een draagbaar apparaat. In het veld kan in situ de indringingsweerstand van de bodem worden bepaald tot een diepte van maximaal 1 meter. Voor de meting wordt met de hand een conus in de grond gedreven. Met een sensor wordt de indringingsweerstand gemeten in MPa. Afhankelijk van het type apparaat wordt per diepte de weerstand op een drukmeter afgelezen of kunnen de meetwaarden digitaal worden uitgelezen en in een diepte-druk-grafiek worden weergegeven.</p> <p>Afhankelijk van de indringingsweerstand van de bodem, kan een bredere of smallere conus worden gebruikt. Hiermee kan optimaal gebruik worden gemaakt van de nauwkeurigheid van de drukmeter.</p> <p>De meting wordt enkele malen herhaald om een reproduceerbaar resultaat te verkrijgen. Mede hierdoor is de meting relatief tijdsintensief.</p>			
Link naar Bodemrichtlijn	n.v.t.			
Te meten gidsparameter	Indringingsweerstand in Newton/cm ² (uitgedrukt in MPa). De weerstand die bij een gegeven textuur, afhankelijk is van meerdere parameters parameters als vochtgehalte, dichtheid en de sterkte van de binding tussen minerale deeltjes.			
Directe of indirecte meting	Direct als de indringingsweerstand als een mate van relatieve verdichting wordt beschouwd.			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Dichtheid			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Beproefde techniek Toepassing voor verdichting in beginfase	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Dieptebereik	1,0 m	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	Puntmeting	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Toepasbaarheid	Geen beperkingen bekend	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Aanbeveling voor toepassing	De parameters waarvan de meetwaarde afhankelijk is, kunnen in de loop van de tijd veranderen door kortere termijnprocessen die los staan van verdichting (bijv. vochtgehalte).	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Praktische punten van belang voor toepassing	Herhalingsmetingen zijn nodig om een representatieve waarde te meten. Combinatie met conussen in de pen zijn mogelijk voor gelijktijdige waarneming van andere parameters (bijv. vochtgehalte).	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar

Techniek	11 - Zand-/grindvervangning			
Variant (indien van toepassing)	-			
Algemene techniekbeschrijving	Betreft een puntbepaling waarbij het volume van een bodemdeel wordt bepaald door dit te vervangen door zand of grind. Van het verwijderde volume wordt het vochtgehalte en het gewicht bepaald (Standaard RAW bepalingen 2015 proef 7)			
Link naar Bodemrichtlijn	n.v.t.			
Te meten gidsparameter	Natte en droge dichtheid (kg/m ³)			
Directe of indirecte meting	Directe meting			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Natte en droge dichtheid (kg/m ³)			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Beproefde techniek	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Dieptebereik	Tot circa 0,3 meter	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	Beproefde techniek	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Toepasbaarheid	Betreft puntmetingen	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Aanbeveling voor toepassing	Kostbare methode	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Praktische punten van belang voor toepassing	Methode wordt met name gebruikt in puinfunderingen.	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar

Techniek	12 - Steekring-methode			
Variant (indien van toepassing)	-			
Algemene techniekbeschrijving en link naar Bodemrichtlijn	Dit betreft een puntbepaling, waarbij het volume van een bodemdeel wordt bepaald door dit te bemonsteren in een steekbus van bekend volume. Van het verwijderde volume worden het vochtgehalte en het gewicht bepaald. (Standaard RAW bepalingen 2015 proef 6)			
Link naar Bodemrichtlijn	n.v.t.			
Te meten gidsparameter	Natte en droge dichtheid (kg/m ³)			
Directe of indirecte meting	Directe meting			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Natte en droge dichtheid (kg/m ³)			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Beproefde techniek	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Dieptebereik	Tot ca. 0,3 m	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	Beproefde techniek	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Toepasbaarheid	Betreft puntmetingen	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Aanbeveling voor toepassing	Verificatiemethode	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Praktische punten van belang voor toepassing	Eenvoudige methode	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar

Techniek	13 - Nucleaire methode			
Variant (indien van toepassing)	-			
Algemene techniekbeschrijving en link naar Bodemrichtlijn	Dit betreft een puntbepaling waarbij de dichtheid van een bodemdeel wordt bepaald door dit afname van uitgezonden gammastraling. (Standaard RAW bepalingen 2015 proef 8)			
Link naar Bodemrichtlijn	n.v.t.			
Te meten gidsparameter	Natte en droge dichtheid (kg/m ³)			
Directe of indirecte meting	Indirecte bepaling			
Uit meting af te leiden bodemeigenschap	Natte en droge dichtheid (kg/m ³)			
Toepasbaarheid op verschillende schaalniveaus	Maaiveld	Drone	Airborne	Satelliet
Ontwikkelingsfase	Standaard methode	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Dieptebereik	Tot 0,3 meter	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Onderscheidend vermogen (meetparameter versus feitelijke mate van verdichting)	Beproefde techniek	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Toepasbaarheid	Betreft puntmetingen	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Aanbeveling voor toepassing	Snelle verificatiemethode	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar
Praktische punten van belang voor toepassing	Door het gebruik van nucleaire bronnen is de methode relatief kostbaar en mag alleen worden uitgevoerd door hiervoor gekwalificeerde personen	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar	Niet toepasbaar