



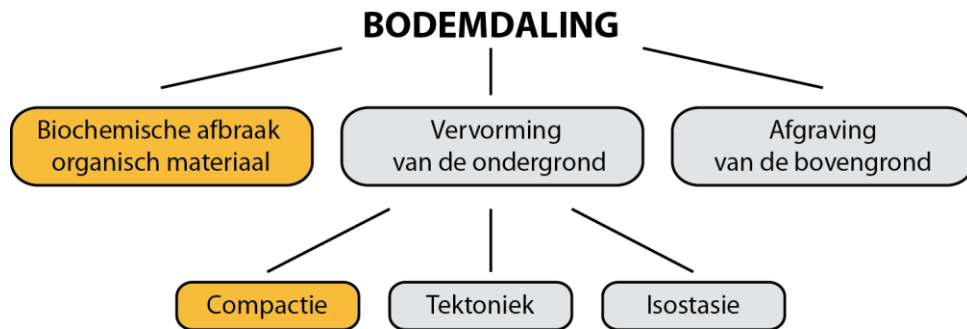
Bodemdaling

Deze Deltafact richt zich op processen die bodemdaling veroorzaken. Hierbij ligt de focus op ondiepe bodemdalingsprocessen in veen- en kleigronden. Daarnaast wordt er een globaal overzicht gegeven van methoden om bodemdaling te meten en modelleren.

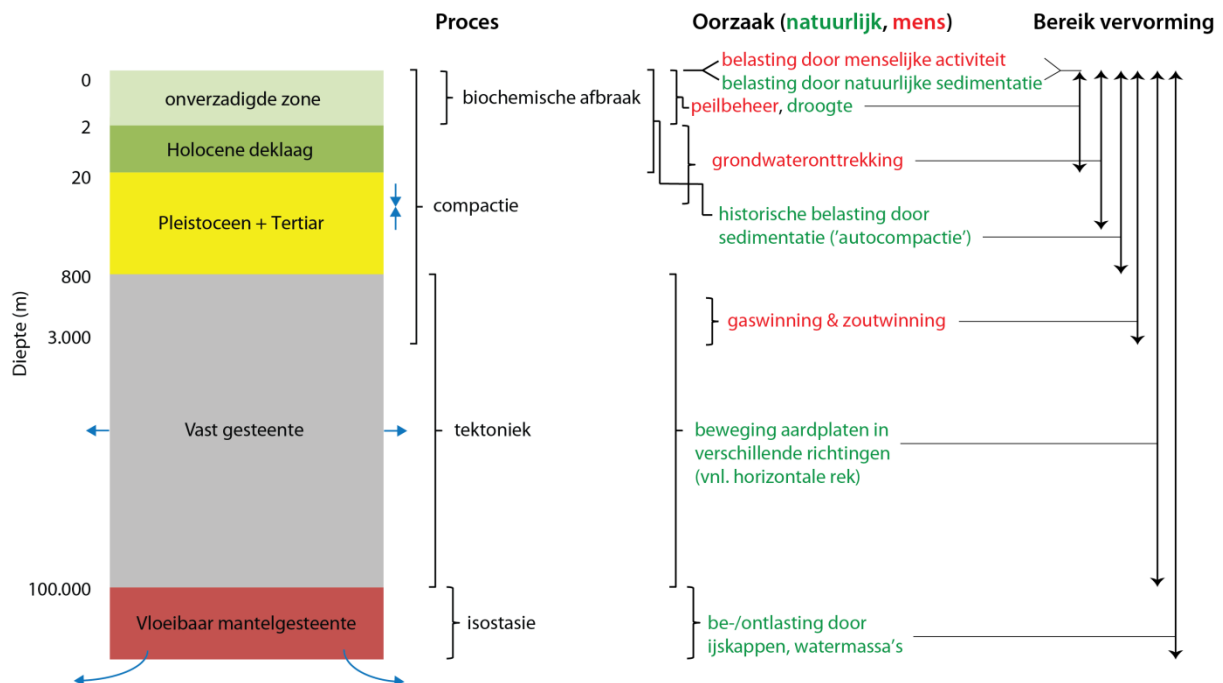
1. INLEIDING
2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
3. BODEMDALINGSPROCESSEN
4. METEN EN MODELLEREN
5. HANDELINGSPERSPECTIEVEN
6. PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK
7. KENNISLEEMTES
8. BRONNEN & LINKS
9. DISCLAIMER

1. Inleiding

Bodemdaling is het proces waarbij het maaiveld, of een niveau in de ondergrond, zakt ten opzichte van een referentievlak, bijvoorbeeld het Normaal Amsterdams Peil (NAP). In de praktijk wordt met de term bodemdaling vaak maaiveldaling bedoeld. Bodemdaling wordt voornamelijk veroorzaakt door vervorming van de ondergrond als gevolg van met name compactie, tektoniek en isostasie (Figuur 1). Daarnaast kan bodemdaling worden veroorzaakt door biochemische afbraak van organisch materiaal. Maaiveldaling kan ook plaatsvinden door afgraving van de bovengrond. Deze Deltafact richt zich voornamelijk op bodemdaling door compactie en biochemische afbraakprocessen.



Figuur 1 Schematisch overzicht van de belangrijkste oorzaken van bodemdaling. Deze Deltafact richt zich op bodemdaling door compactie en biochemische afbraak van organisch materiaal (in oranje).



Figuur 2 Schematisch overzicht van processen en oorzaken van bodemdaling, waarbij het dieptebereik waarbinnen het proces of de oorzaak optreedt, en het bereik van de vervorming, grofweg is aangegeven. Van toepassing op de situatie in Nederland. De processen worden toegelicht in Hoofdstuk 3.

Bodemdaling is een complex verschijnsel in de zin dat het veroorzaakt wordt door diverse processen die plaatsvinden tussen maaiveld en meer dan honderd kilometer diepte. Bodemdaling wordt zowel door natuurlijke (geologische) processen als door menselijke activiteit veroorzaakt (Figuur 2). Met bodemdaling wordt over het algemeen de trend van daling over tijdsperioden van jaren of meer bedoeld. Op kortere tijdschalen is bodembeweging vaak variabel met afwisselingen van daling en stijging door seizoenale veranderingen in bodemvocht, grondwaterstanden of de stijghoogte in watervoerende pakketten.

In deze Deltafact wordt compactie gebruikt als algemene term voor (verticale) mechanische verdichting van de ondergrond. De term compactie omvat diverse termen zoals samendrukking, klink, zetting, consolidatie, kruip, compressie, krimp en rijping. Deze verschillende termen zijn ontstaan vanuit verschillende vakgebieden of sectoren, zoals de geotechniek, geologie, of de landbouwsector. Deze termen beschrijven in sommige gevallen (deels) hetzelfde proces, maar kunnen ook een combinatie van andere termen beschrijven. De terminologie rondom compactie is dus niet eenduidig, wat verwarring kan veroorzaken. Met biochemische afbraak wordt in deze Deltafact voornamelijk oxidatie van organisch materiaal bedoeld.

Natuurlijke bodemdalingssnelheden treden vaak op in de orde grootte van millimeters per jaar. In veel dichtbevolkte laaggelegen kustgebieden zoals Nederland worden bodemdalingsprocessen (compactie en oxidatie) echter versneld door bijvoorbeeld onttrekking van water, gas en/of olie, winning van zout, peilverlaging, en belasting aan het oppervlak. Hierdoor kunnen, in ieder geval voor kortere perioden, bodemdalingssnelheden optreden van orde grootte van centimeters per jaar (Stouthamer & van Asselen, 2015).

Bodemdaling is wereldwijd een toenemend probleem in laaggelegen kustgebieden. Terwijl de zeespiegel stijgt, daalt het landoppervlak in deze vaak dichtbevolkte gebieden. De gevolgen van bodemdaling zijn, onder andere, een groter risico op overstroming, vernatting, schade aan gebouwen en infrastructuur, en verzilting van het grondwater. Zeker in laaggelegen dichtbevolkte kustgebieden leiden deze gevolgen tot hoge kosten om schade te verhelpen of tegen te gaan. Om effectieve maatregelen te kunnen ontwikkelen om (de gevolgen van) bodemdaling te verminderen of te stoppen is het essentieel om te begrijpen welke processen bijdragen aan de totale bodemdaling zoals deze ervaren wordt aan het maaiveld. Gezien de complexiteit van bodemdaling is dit een grote uitdaging. Vaak gaat hierdoor de aandacht uit naar bepaalde processen waarvan verwacht wordt dat deze een dominante bijdrage leveren voor de locatie en de tijdsperiode waarvoor bodemdaling moet worden doorgrond. Hierdoor kunnen echter belangrijke bijdragen van andere processen over het hoofd worden gezien, en zullen deze ook niet worden meegenomen in het aanpakken van bodemdaling.

2. Gerelateerde onderwerpen en Deltafacts

Onderwerpen: bodemdaling, veen, klei, compactie, oxidatie, meten, modelleren.

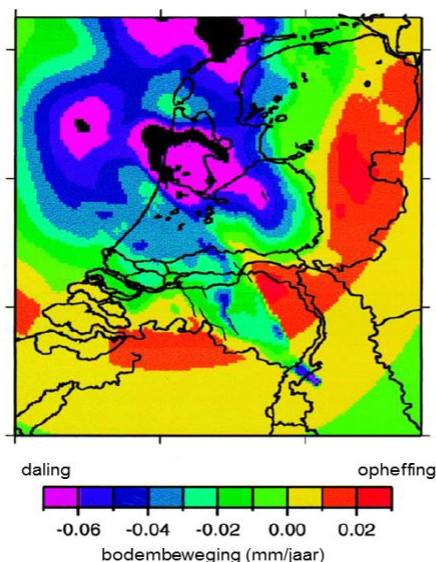
Deltafacts: Natte teelten, onderwaterdrains, dynamisch peilbeheer, Remote sensing waterkwantiteits- en waterkwaliteitsbeheer.

3. Bodemdalingsprocessen

Hieronder worden de verschillende processen die leiden tot bodemdaling toegelicht (grotendeels gebaseerd op Erkens en Kooi, 2018; Hijma en Kooi, 2018a).

Tektoniek

Tektoniek heeft betrekking op bewegingen en vervormingen van ca. 50-100 km dikke aardplaten (ook wel de lithosfeer genoemd) die ontstaan door krachten die die de platen op elkaar uitoefenen. Deze krachten ontstaan doordat de aardplaten in verschillende richtingen bewegen (plaattektoniek), over de onderliggende vloeibare asthenosfeer heen. Het botsen of langs elkaar heen schuiven van aardplaten leidt tot plooiing van gesteentelagen en breukwerking en gaat gepaard met opheffing of daling van het aardoppervlak. Geologische studies in Nederland duiden op tektonische bewegingen met snelheden tot enkele tienden van millimeters per jaar (Figuur 3; Kooi 1998; Houtgast en van Balen, 2000; Cohen, 2003; Stouthamer en Berendsen, 2000). Dit betreffen gemiddelde snelheden over lange perioden van duizenden tot miljoenen jaren.

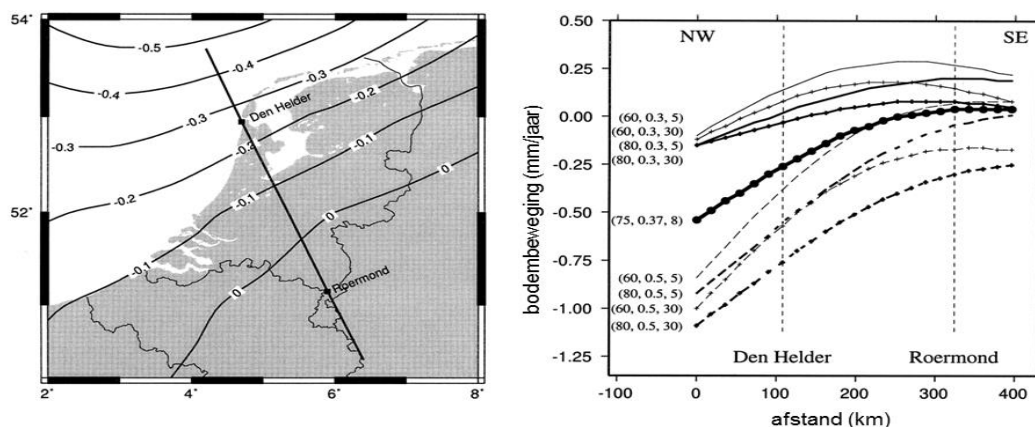


Figuur 3 Reconstructie van de gemiddelde bodembeweging door tektoniek over de afgelopen 2.5 miljoen jaar (naar Kooi, 1998). Het is niet uitgesloten dat het ruimtelijk beeld er op dit moment (bijvoorbeeld over een periode van enkele tientallen jaren) anders uit ziet en dat snelheden plaatselijk of regionaal veel hoger zijn.

Isostasie

Isostasie is het proces waarbij de aardkorst beweegt door gewichtsveranderingen. Omdat de aardplaten 'drijven' op het vloeibare gesteente van de aardmantel (asthenosfeer), kunnen de platen naar beneden worden gedrukt als er een gewicht op komt, bijvoorbeeld een ijskap of een grote watermassa. De zone om het gewicht heen komt hierbij omhoog, totdat er een evenwicht is bereikt. Als de ijskap of watermassa weer verdwijnt, veert de aardkorst weer terug naar boven, en de omliggende zone weer omlaag, totdat een nieuw evenwicht is bereikt.

Ook in Nederland is er op dit moment sprake van een isostatische component van bodembeweging, als gevolg van gewichtsveranderingen veroorzaakt door het afsmelten van de ijskap op Skandinavië aan het eind van de laatste glaciële periode, waarbij tevens de Noordzee, die in de laatste glaciële periode drooglag, weer volstroomde (Kooi, 1998; Hijma en Kooi, 2018a; 2018b). Deze isostatische bewegingen worden geschat met behulp van modellen en zeespiegelreconstructies uit boringen. Deze laten zien dat er in ons land een lichte kanteling in noordwestelijke richting plaatsvindt, waarbij de dalingssnelheid in noordwestelijke richting toeneemt (Figuur 4). Door de grote afstanden waarover het mantelgesteente moet stromen en het taai karakter ervan duurt het tienduizenden jaren voordat een nieuw evenwicht wordt bereikt.



Figuur 4. Kaart van de meest waarschijnlijke schatting van de huidige bodembeweging (mm/jaar) door isostasie (links). Range van mogelijke oplossingen weergegeven als profielen voor de lijn Roermond – Den Helder (naar Kooi, 1998). Recente studies die worden besproken door Hijma e.a. (2018b) wijzen op dalingssnelheden van ca. 0.2 mm/jaar in Zeeland en 0.5 tot 0.8 mm/jaar in het Waddengebied.

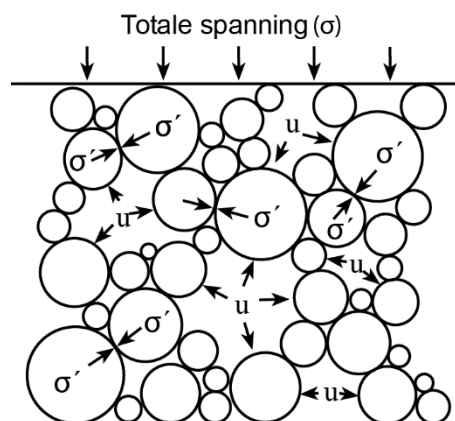
Compactie

Compactie is de mechanische verdichting van het korrel skelet. Bij die verdichting neemt de porieruimte af. Dit vertaalt zich direct naar een afname van de dikte van bodemlagen wat voor bodemdaling zorgt. Compactie treedt op als de effectieve spanning (of korrelspanning) toeneemt. De effectieve spanning (σ') wordt berekend met de formule van Terzaghi:

$$\sigma' = \sigma - \mu, \quad (1)$$

waar σ = totale spanning (gewicht van bovenliggend materiaal) en μ = waterspanning (Figuur 5).

De effectieve spanning kan toenemen als er een bovenbelasting wordt aangebracht waardoor water en/of lucht uit de poriën worden gedrukt. Ook kan de effectieve spanning toenemen door het afnemen van water- of gasdruk in de poriënruimte waardoor het gewicht van alle ondieper gelegen bodemlagen en constructies minder door water of gas wordt gedragen en meer door het korrel skelet. Dat is bijvoorbeeld het geval bij onttrekkingen/bemalingen en bij verlaging van het freatisch peil (Figuur 6).



Figuur 5. De totale spanning (bovenbelasting) is de som van de effectieve (korrel)spanning en de waterspanning (en de gasspanning, maar die is meestal verwaarloosbaar). Bron: van Asselen (2011).

Ook in de onverzadigde zone kan de effectieve spanning sterk toenemen door verdamping, afname van het bodemvocht en de daarmee gepaard gaande toename van de zuigspanning in de bodem. De laatste vorm van compactie wordt meestal aangeduid met 'krimp', deze term wordt verderop in deze Deltafact verder toegelicht.

Compactie is afhankelijk van de sterkteparameters van de bodem, waarbij veen en klei sterker samendrukbaar zijn dan zand. Iedere grondsoort heeft eigen samendrukbaarheidsparameters, die afhankelijk zijn van de samenstelling van de grond en de al doorgemaakte belastings- en compactiegeschiedenis. Omdat er diverse parameterdefinities worden gebruikt in verschillende formuleringen voor compactieberekeningen worden deze niet in deze Deltafact gespecificeerd.

Hieronder worden de verschillende termen toegelicht die betrekking hebben op compactie.

Consolidatie en compressie

Consolidatie is een term afkomstig uit de geotechniek en beschrijft het proces van compacteren van slecht-doorlatende lagen (Verruijt, 2001). Compactie van een met water verzadigde bodemlaag vereist dat er poriënwater uit de laag wegstroomt nadat de laag is belast. De snelheid waarmee het poriënwater wegstroomt, bepaalt de snelheid van compactie, en dus ook van de bodemdaling die de compactie veroorzaakt. Vooral voor dichte en dikke kleilagen gaat dat heel langzaam. In extreme gevallen kan de consolidatietijd (periode van ontwatering of fase van primaire consolidatie) honderden tot duizenden jaren bedragen. Voor de Holocene deklaag liggen waarden naar verwachting typisch tussen een week en een jaar. En voor kleimonsters die worden getest in laboratoriumproeven minder dan een dag. Compressie wordt in de grondmechanica wel gebruikt als equivalent van consolidatie, maar is net als compactie meer algemeen, niet specifiek gekoppeld aan de tijdsfactor en ook niet aan slecht-doorlatende lagen.

Natuurlijke compactie (ook: autocompactie) op grote diepte (dieper dan ca. 300 m)

Op veel plaatsen in de wereld bevinden zich heel dikke, slecht-doorlatende kleilagen in de ondergrond en zijn deze lagen in de meer recente geologische geschiedenis belast door het gewicht van jongere sedimenten. Door de grote consolidatietijd van de kleilagen kan de consolidatie van de kleilagen die in gang is gezet door de jongere sedimentatie, nu nog gaande zijn. Voor West- en Noord-Nederland is modelmatig onderzocht of kleilagen uit het Tertiair (~2,5 – 65 miljoen jaar oud) die voorkomen tot een diepte van ca. 1200 m, op deze wijze nog een bijdrage leveren aan bodemdaling op dit moment (Kooi, 2000; Kooi, 2008). Alleen in het duingebied zouden in theorie dalingsnelheden van 1 a 2 mm/jaar door natuurlijke compactie van de diepe ondergrond kunnen voorkomen. Daarbuiten gaat het over het

algemeen over minder dan 0.1 mm/jaar. Voor de Mississippi Delta in de Verenigde Staten zijn waarden tot 5 mm/jaar berekend (Meckel e.a., 2006).

Kruip

Kruip is het proces waarbij het korrelskelet zich langzaam reorganiseert zonder dat dit direct wordt gedreven door een toename van effectieve spanning. Kruip treedt tegelijkertijd op met de fase waarin het poriënwater wordt uitgedrukt (primaire consolidatie), maar kan ook nog heel lang doorgaan (secundaire consolidatie). Kruip komt met name voor in veen- en kleigronden, en kan in deze gronden tot aanzienlijke restzettingen zorgen.

Zetting

De term zetting wordt meestal gebruikt in situaties waar er sprake is van een kunstmatig aangelegde bovenbelasting. Het is iets wat constructies en de funderingslaag eronder ondergaan. Zetting wordt ook wel als equivalent van zakking of daling gebruikt en maaiveldzetting, -zakking, en -daling worden allemaal gebruikt om een neerwaartse beweging van een punt of vlak te beschrijven.

Klink

Klink is een term die heel verschillende betekenissen kent. In de geotechniek staat het voor de verdichting en dikteafname van ophoogmateriaal. In de grondmechanica gaat het alleen om compactie in de verzadigde ondergrond (Schothorst, 1966; Cultuurtechnische vereniging, 1988). In de bodemkunde wordt klink gebruikt als term voor consolidatie inclusief krimp (en soms zelfs oxidatie) (Zuur, 1958). Deze processen spelen in de onverzadigde bodem en de direct daaronder liggende (klei)lagen. Bij klink gaat het om het irreversibele deel (zie paragraaf over krimp). Klink wordt in de bodemkunde specifiek gebruikt in situaties waarin er geen bovenbelasting wordt aangebracht, bijvoorbeeld bij peilverlagingen. Dat wordt vaak aangegeven met de vermelding dat het gaat om verdichten van de bodem onder het eigen gewicht.

Rijping

Bij drooglegging en drainage van (klei)bodems spreekt men van rijping, wat meer een bodemvormend proces is en een combinatie van krimp (zie hieronder), consolidatie en soms ook verwerking van organische bestanddelen aan de lucht. Wanneer een grond droogvalt (bijvoorbeeld na inpoldering) is er eerst nog sprake

van een tweefasig systeem, bestaande uit een vaste fase en een vloeibare fase. Door verdamping, ontwatering (aanleg sloten en drainage) en door wateropname door plantenwortels verdwijnt er water. De grotere poriën raken leeg en gevuld met lucht. In het zo ontstane driefasig systeem neemt bij verdergaande wateronttrekking de waterspanning af (wordt steeds negatiever) en worden de vaste delen naar elkaar toegetrokken door deze zuigspanning (dit resulteert in toename van de korrelspanning). Gevolg hiervan is dat de grond in elkaar wordt gedrukt (krimpt), met als gevolg dat het maaiveld decimeters tot meer dan een meter kan zakken.

Voor rijping is uitdroging nodig. De plaatselijke waterhuishouding (kwel, wegzijging, drainage), klimaat en gewas spelen daardoor een grote rol. Beworteling is een zeer efficiënte manier om grond ook in de diepte uit te drogen en te laten rijpen. Zonder beworteling blijft de rijping en scheurvorming op diepte achterwege en beperkt dit zich tot een aantal decimeters diepte. De soort begroeiing maakt dus sterk uit. Gras heeft een beperkte bewortelingsdiepte, akkerbouwgewassen tot meer dan een meter en bomen en struiken kunnen wel tot twee meter diepte bewortelen. In de Flevopolders hebben we in het algemeen akkerbouw en scheurdiepten van ca. 1 meter diepte.

Naast het lutumgehalte en organische stofgehalte versterkt ook de aanwezigheid van kalk de stabiliteit van de pedons (kleikolommen) tussen de verticale scheuren. Door de ontstaansgeschiedenis (voormalige Zuiderzee) is bijvoorbeeld het kalkgehalte in de Flevopolder hoog en zal deze bijdragen aan de stabiliteit van de pedons.

Scheurvorming kan worden verhinderd of beperkt door storende lagen in de vorm van niet doorwortelbare zandlagen of schelpenlagen. Veenlagen scheuren niet zozeer, maar vergroten vooral de maaiveldaling. Door ploegen van landbouwgrond verdwijnen de scheuren en worden tot ca. 40 cm diepte gedicht. Het volume aan scheuren is hierbij als het ware omgezet in maaiveldaling. In een aantal gevallen wordt het profiel "verbeterd" door diepploegen of omzetten van de bovenste meter en zelfs dieper, waardoor de rijpingsscheuren volledig worden omgezet in maaiveldaling. De diepere half gerijpte lagen die naar boven worden gebracht gaan vervolgens verder rijpen en veroorzaken verdere bodemdaling. Een meer sluipend gevaar is dat door zeer hoge wiellasten in de landbouw de rijpingsscheuren worden dichtgedrukt. Daarbij worden de pedons in de onderliggende niet of weinig gerijpte

grond gedrukt of de natte, slappe onderkant van de pedons bezwijkt. De scheuren worden door deze twee mechanismen dus van onderop gedicht. In welke mate dit gebeurt is onbekend, maar de mogelijke maaiveldaling is groot.

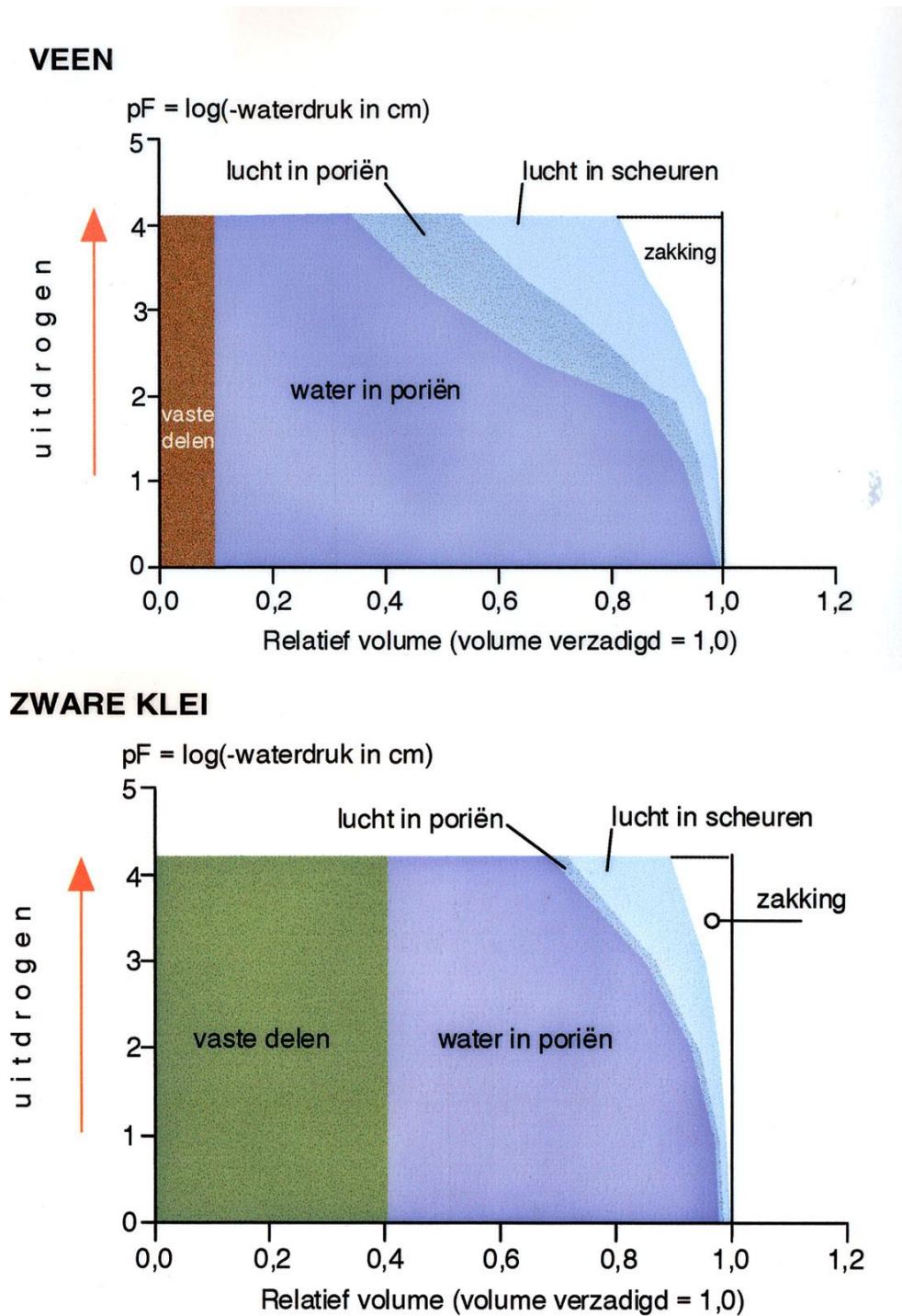
Krimp

Krimp is het proces waarbij een onverzadigd stuk klei- of veengrond wordt samengedrukt door periodieke toename van de zuigspanningen in de bodem. Dit wordt veroorzaakt door bijvoorbeeld uitdroging door ontwatering en door verdamping, voornamelijk door het gewas. Plantenwortels kunnen de grond sterk uitdrogen en veel krimp veroorzaken. Krimp is deels onomkeerbaar. Dit deel wordt irreversibele krimp genoemd en is eigenlijk het laatste stadium van de rijping van de grond. Het omkeerbare deel wordt reversibele krimp genoemd. Bij het weer vochtiger worden van de grond zwelt deze dan weer net zoveel op als de krimp door de droogte. Vooral bij grond met een hoog organisch stofgehalte, bijvoorbeeld veen, kan hydrofobie het zwelproces sterk vertragen. Dit houdt in dat de krimpcurve (relatie krimp versus vochtgehalte) sterk kan verschillen van de zwelcurve. Dit wordt hysteresis genoemd. Zo kan veengrond onder water staan, dus verzadigd, terwijl er nog scheuren in zitten, die pas op termijn weer dichtzwellen.

Bovenin het bodemprofiel is de grond veel droger en daarmee sterker en stijver dan op grotere diepte. Daarnaast is bovenin het bodemprofiel de belasting van bovenliggende grond niet of in geringe mate aanwezig. De krimp is daarom bovenin het bodemprofiel isotroop (in alle 3 dimensies gelijk) en veroorzaakt in gelijke mate zakking ($1/3^e$ van het krimpvolume) en scheurvorming ($2/3^e$ van het krimpvolume). Dieper in het bodemprofiel worden de scheuren dichtgedrukt door het bovenliggende gewicht van de grond, waardoor het gehele krimpvolume op die diepte wordt omgezet in bodemdaling aan het oppervlak.

De krimp van klei- en veengronden verschilt sterk. Dit is aangegeven in de Figuur 7. Door uitdroging verdampt water en wordt vervangen door lucht in scheuren en zakking (krimp) en lucht in de grond. Bij zware klei treedt bijna geen lucht in de klei zelf en is het volume verdampt water bijna gelijk aan het volume krimp. Bij veen kan heel veel water verdampen en kan de krimp groot worden. Er treedt echter ook veel lucht in het veen. De bodemdaling door krimp treedt op in orde grootte van mm tot centimeters en kan meer dan 10 cm bedragen. Door zwel kan de bodem in

dezelfde mate weer stijgen. Indien de zwel kleiner is dan de krimp, dan is een deel van de krimp irreversibel, wat duidt op een verdere rijping van de grond.



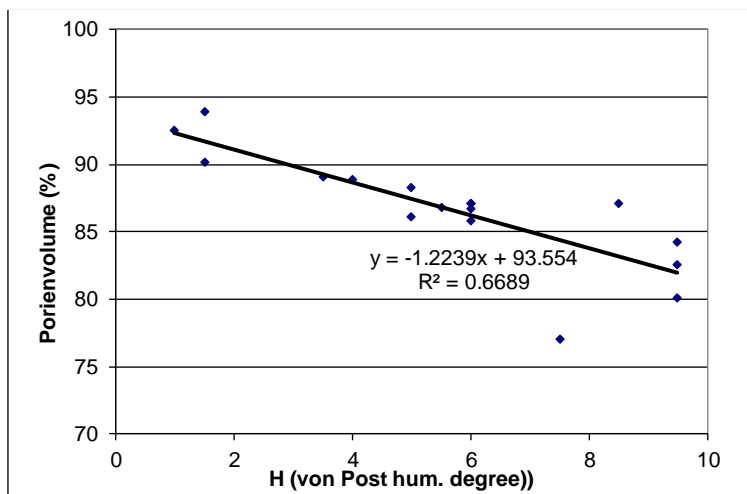
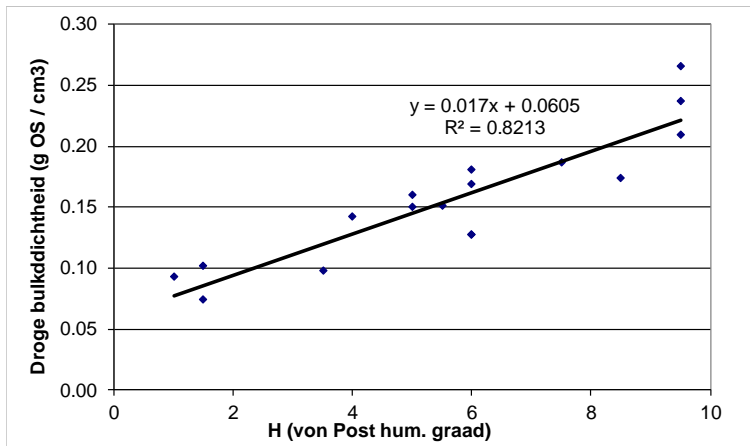
Figuur 7 Vergelijking krimp van veen (boven) en zware klei (onder).

Oxidatie

Oxidatie is het proces waarbij organisch materiaal wordt afgebroken. Hierbij komt CO₂ vrij. Dit leidt tot een volumevermindering en daling van het oppervlak.

Daarnaast komen ook nutriënten zoals N en P vrij (mineralisatie), waarvan de N deels wordt omgezet in N₂O (lachgas). Oxidatie vindt met name plaats door blootstelling aan zuurstof in de lucht, maar kan ook in waterverzadigde zones in de bodem voorkomen. Daar wordt zuurstof gebruikt uit oxidatoren zoals nitraat en sulfaat en zuurstof ingebouwd in de biomassa zelf. In het algemeen en op de lange duur is de afbraak door zuurstof uit de lucht bij verre de grootste factor voor bodemdaling door oxidatie. Deze afbraak is een biochemisch proces (vertering) van het plantmateriaal. Een klein deel van de koolstof in het veen wordt geheel onder water anaeroob afgebroken tot CH₄ (methaan). Dit gebeurt dus ook op grote diepte, maar vormt al met al slechts een beperkt deel van de veenafbraak en daarmee bodemdaling.

De bodemdaling door oxidatie ontstaat deels doordat een hoeveelheid organische stof als CO₂ de lucht in verdwijnt, maar ook omdat de structuur van het veen door de afbraak verandert van vezelig plantmateriaal naar veraard materiaal. Doordat de vezelstructuur wordt afgebroken in kleinere delen, zakt de oorspronkelijke luchtige structuur in door het eigen gewicht, eventuele belasting en krimp, waardoor het veen dichter wordt (compactie) en bodemdaling optreedt. Dit deel van het proces heeft een zekere analogie met rijping van kleigronden. Door het dichter worden van de veengrond neemt het poriënvolume af en daarmee ook de hoeveelheid water die de veengrond in verzadigde toestand bevat (zie Figuur 8). Doordat in Nederland de slootpeilen meestal periodiek worden aangepast aan de maaiveld daling om de vereiste drooglegging te handhaven, kan het oxidatieproces blijven doorgaan waarbij voortdurend veen letterlijk in de lucht opgaat als CO₂.



Figuur 8 Relatie tussen droge bulkdichtheid aan organische stof (OS) (boven) en poriënvolume (onder) en de humificatiegraad volgens Von Post (1924) ($H = 1$ is niet aangetast, $H = 10$ is geheel veraard veen).

Op zeker moment kan de veenlaag zo dun worden dat de grondwaterstand in de zomer tot onder de veenlaag zakt en de maaiveld daling langzaam asymptotisch minder wordt tot de veenlaag uiteindelijk door de onderliggende minerale laag wordt geplougd. Als een veenlaag dunner wordt dan 40 cm wordt deze op de bodemkaart van Nederland niet meer als veengrond geclassificeerd, maar als moerige grond. Wordt de laag dunner dan 10 cm dan wordt de grond geclassificeerd volgens de minerale grond onder de veenlaag. Direct na ontginning en drooglegging spelen vooral consolidatie, rijping en (irreversibele) krimp de grootste rol in de bodemdaling. Na enkele tot een tiental jaren neemt deze fysische bodemdaling relatief sterk af en gaat bij veen de bodemdaling door oxidatie de hoofdrol spelen omdat deze gestaag en in dezelfde mate doorgaat als steeds weer de slootpeilen worden aangepast aan de maaiveld daling. Dit is een doorgaand proces dat eeuwen kan duren en meters aan bodemdaling kan veroorzaken.

4. Meten en modelleren

Bodemdaling meten

Bodemdaling kan worden gemeten met veldmetingen of met remote sensing technieken. Bij veldmetingen gaat het doorgaans om puntmetingen. Bij remote sensing technieken kunnen makkelijker vlakdekkende beelden worden verkregen. Deze technieken zijn nog wel experimenteler van aard dan veel veldmeettechnieken, zeker in veenweidegebieden.

Bodemdaling is een langzaam proces, met snelheden in de orde grootte van mm tot cm per jaar. Het is dus belangrijk om over langere perioden (meerdere jaren) consistent te meten om een bodemdalingssignaal te detecteren. Om seizoensgebonden daling en stijging van het oppervlak als gevolg van zwel en krimp uit het bodemdalingssignaal over langere tijdschaal te filteren is het van belang om meerdere keren per jaar te meten (bijv. minimaal elk kwartaal).

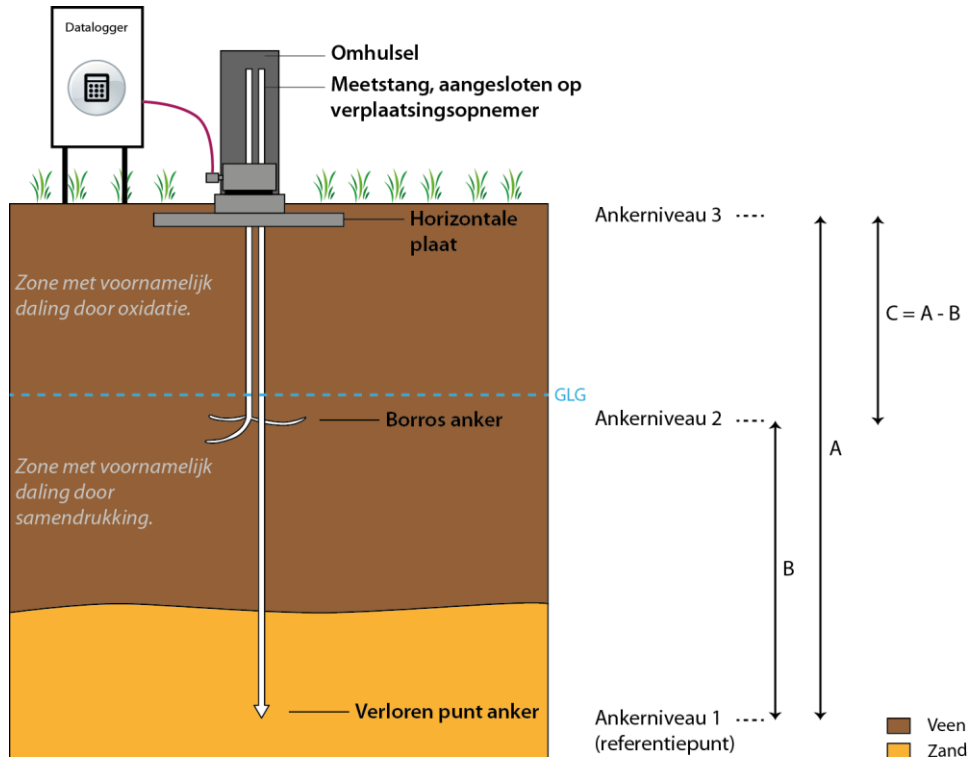
Hieronder worden de belangrijkste methoden om bodemdaling te meten beschreven.

Veld meetmethoden

De meest beproefde methode om maaiveldbeweging te meten maakt gebruik van waterpassen. Op puntlocaties wordt de hoogte van het maaiveld ten opzichte van een referentiepunt ingemeten met een waterpasinstrument en baak. De metingen hebben een mm-nauwkeurigheid. De methode wordt vooral toegepast in stedelijke omgeving, maar is ook voor hoogtekarten, als voorbereiding op peilbesluiten en de monitoring van maaiveldddaling in veenweidegebieden (Schothorst, 1966; Beuving en Van den Akker, 1996; Pleijter en van den Akker, 2007; van Asselen en Erkens, 2019). Het referentiepunt bestaat doorgaans uit een NAP hoogtemerk of een buis of stang die gefundeerd is in een dieperliggende stabiele zandlaag. De top van de buis of stang is het referentiepunt, welke ingemeten dienen te worden met een waterpassing vanaf een bekend NAP hoogtemerk of een nauwkeurige (RTK)GPS (vaak ten opzichte van een NAP hoogtemerk). In Noord- en West-Nederland wordt de stabiele zandlaag meestal gevormd door het Pleistocene zand onder de Holocene deklaag. In veenweidegebieden vindt het waterpassen doorgaans plaats langs raaien, waarbij op vaste tussenafstanden (orde grootte van meters, afhankelijk van

de grootte van het perceel) gemeten wordt en een gemiddelde hoogte wordt berekend voor een perceel. Onderaan de baak kan een horizontaal plaatje van ca. 10 x 10 cm worden bevestigd om de onregelmatigheid van het oppervlak te vereffenen.

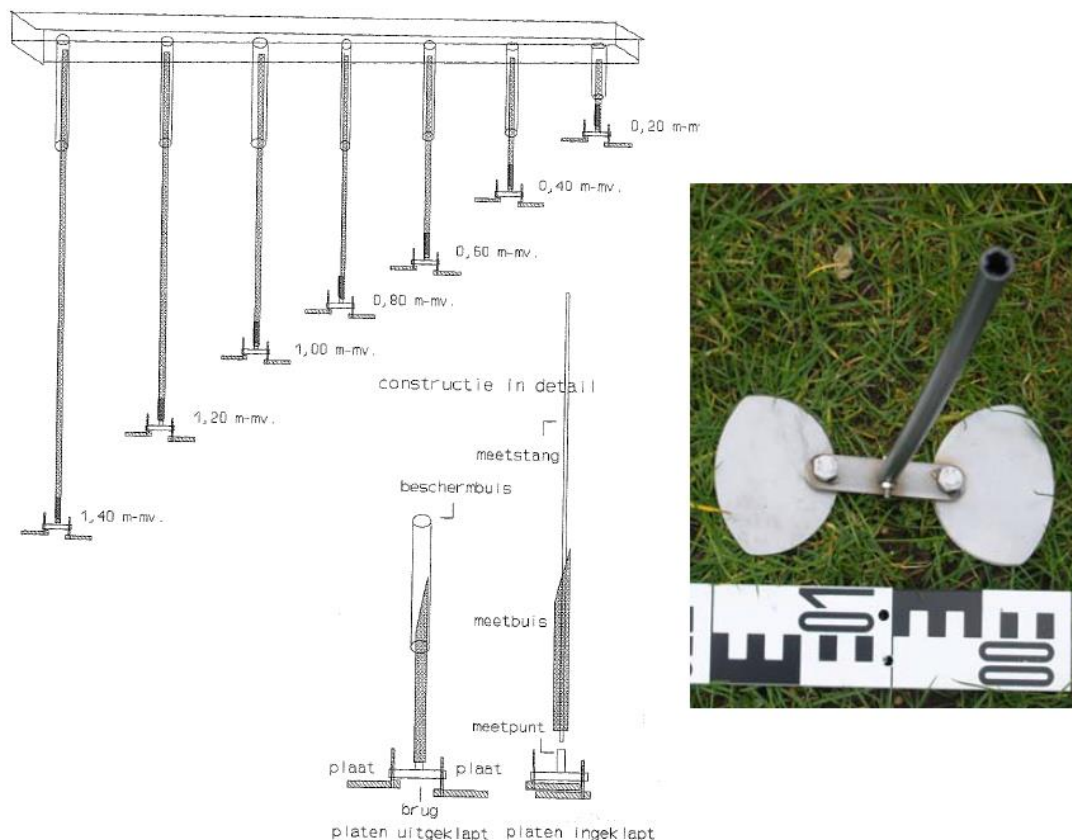
Een extensometer is een gefundeerde meetstang met ankers op meerdere niveaus, waarmee de bijdrage van verschillende bodemlagen aan de totale bodembeweging (continu) gemeten kan worden. Het betreft puntmetingen met een nauwkeurigheid op mm-schaal. Extensometers worden, in verschillende uitvoeringen, wereldwijd gebruikt voor het meten van bodemdaling, maar zijn in Nederland nog weinig gebruikt, zeker niet in veenweidegebieden. Een meetsite waar dit wel gebeurt, sinds eind 2018, is het veenweidegebied in de omgeving van Rouveen. Hier zijn op 4 locaties extensometers geplaatst. Door op verschillende niveaus in de ondergrond te meten kan de bijdrage van verschillende processen aan de totale bodemdaling worden bepaald. Bij de meest eenvoudige opstelling in Rouveen wordt op drie niveaus gemeten (Figuur 9), met verschillend typen ankers (voor details zie van Asselen en Erkens, 2019). Het diepste niveau zit in de top van de stabiele zandlaag en dient als referentieniveau voor de bovenliggende ankerniveaus. Het middelste niveau (2) ligt net onder de GLG, het bovenste niveau (3) net onder maaiveld (Figuur 9). Niveau 2 meet de daling veroorzaakt door processen die spelen in het veen onder de grondwaterspiegel (voornamelijk veroorzaakt door compactie; B in Figuur 9). Niveau 3 meet de totale daling van de grondlaag tussen grofweg het maaiveld en het referentieniveau. Het verschil tussen niveaus 2 en 3 is de daling veroorzaakt door processen in de grondlaag tussen het maaiveld het GLG-niveau (voornamelijk oxidatie).



Figuur 9 Schematische weergave van het extensometer meetsysteem met 3 ankerniveaus, zoals toegepast in de omgeving van Rouveen, Overijssel (van Asselen en Erkens, 2019).

De ankerstaven komen uit in het opnemershuis, waar met verplaatsingsopnemers de hoogteveranderingen van alle ankers ten opzichte van ankerniveau 1 gemeten. De verplaatsingsopnemers zijn verbonden met een datalogger die in een kast naast het meetpunt staat. Er wordt automatisch gemeten met instelbaar interval.

Ook met zakplaten (of zakbaken) kan op verschillende diepteniveaus gemeten worden. Deze methode is bijvoorbeeld toegepast in Zegveld (Pleijter en van den Akker, 2007). Een zakplaat bestaat uit een buisje waaraan twee uitklapbare RVS ovaal platen zijn bevestigd (Figuur 10). De zakplaten worden op de bodem van een boorgat met bepaalde diepte met behulp van een dopsleutel uitgeklast in het ongestoorde profiel. Het boorgat wordt na plaatsing van de zakplaat opgevuld met materiaal dat afkomstig is uit het boorgat. Over het buisje dat aan de zakplaat is bevestigd wordt een ander buisje geschoven zodat deze op gewenste hoogte kan worden afgewerkt. De zakplaten plus buisjes worden afgedekt met een houten bak of een tegel. De top van de buisjes kunnen worden ingemeten voor het bepalen van de beweging van de verschillende zakplaatniveaus.



Figuur 10 Schematische weergave en foto van een meetopstelling met zakplaatjes (Beuving en van den Akker, 1996).

Andere veldmethoden die kunnen worden gebruikt maken gebruik van:

- Zettingsplaatjes/automatische zakbaken: een druksensor (waterspanningsmeter) is met een slang aangesloten op een reservoir aan een vaste constructie. Het vloeistofniveau in het reservoir blijft op een vaste hoogte en wordt eenmalig vastgelegd t.o.v. NAP. Een extra sensor meet de hoogte van het vloeistof niveau om te controleren op lekkage en om te corrigeren voor niveauveranderingen. De zettingsmeetplaatjes worden in de grond aangebracht en aangesloten op het reservoir en op een datalogger. Aan de hand van drukveranderingen wordt de bodemdaling bepaald. De nauwkeurigheid is in orde grootte van mm-cm.
- Zettingsmeetslang: een meetslang wordt ingegraven op bepaalde diepte en gevuld met water tot een bekend niveau. Op vaste afstanden wordt de hydrostatische druk gemeten met een waterspanningsmeter. Variatie in de waterspanning komt overeen met variatie in de hoogteligging. De nauwkeurigheid is op zijn best ca. 0.5 cm. Omdat het een drukmeting is, is de meting gevoelig voor veranderende weersomstandigheden.

Remote sensing meetmethoden

LiDAR staat voor Light Detection And Ranging. Bij deze technologie worden laserpulsen (lichtgolven) vanuit een scanner gezonden. De scanner is bevestigd aan een paal, of aan een helikopter, vliegtuig of drone. De afstand van de scanner tot het object of oppervlak wordt bepaald door de tijd te meten die verstrijkt tussen het uitzenden van een puls en het opvangen van een reflectie van die puls. De metingen resulteren in een vlakdekkende kaart van de hoogte. Door op een later moment een nieuwe opname van de hoogte te maken kan bodemdaling worden afgeleid door naar de hoogteverandering te kijken. LiDAR vanuit vliegtuigen en drones hebben een absolute nauwkeurigheid van 1-3 cm op landbouwgrond. Om een hogere nauwkeurigheid van mm-cm schaal te halen kan gebruik worden gemaakt van lokale referentiepunten waaraan de LiDAR data kan worden 'opgehangen'.

InSAR staat voor Interferometric Synthetic Aperture Radar. InSAR gebruikt radarbeelden die van de aarde worden gemaakt met een satelliet. Per jaar worden tot vele tientallen beelden verkregen van hetzelfde gebied. Dit wordt gebruikt om gedetailleerde tijdreeksen van hoogteverandering uit af te leiden. InSAR maakt daarvoor gebruik van de fase van de golf van het bij de satelliet terugkerende aan de grond gereflecteerde signaal, niet de tijd tussen vertrek en aankomst van de puls. In tegenstelling tot LiDAR meet InSAR geen hoogte. Er worden alleen hoogteverandering gemeten tussen de radarbeelden. Dat gebeurt voor reflectiepunten aan het oppervlak die een consistent (niet te sterk wisselend en daarmee goed te interpreteren) signaal terugkaatsen. Goede reflectiepunten zijn vooral te vinden in de bebouwde omgeving (delen van daken of het wegdek) en de verticale beweging kan voor die punten vaak worden bepaald met een nauwkeurigheid van minder dan een millimeter per jaar. In een weiland is de consistentie van gereflecteerde radarsignalen kleiner. Daardoor is het voor een weiland moeilijker om met InSAR bodemdaling te bepalen. Op het moment van schrijven zijn er wel ontwikkelingen gaande om deze methode ook in veenweidegebieden nauwkeuriger, en dus toepasbaar, te maken.

Bij het gebruik van fotogrammetrie vliegt een drone of vliegtuig over en maakt foto's van het terrein. De foto's worden vervolgens over elkaar gelegd om een 3D beeld te verkrijgen. Voor hoogtebepalingen zijn er referentiepunten nodig (>5).

Bodemdaling modelleren

Er worden in Nederland diverse softwarepakketten gebruikt voor bodemdalingsberekeningen. De karakteristieken van een aantal daarvan zijn weergegeven in Tabel 1. De pakketten verschillen sterk in het toepassingsbereik, de processen en/of oorzaken die kunnen worden meegenomen en de mate van vereenvoudiging van de procesbeschrijvingen.

Software pakket	Dimensionaliteit	Processen	Toepassingsbereik	Belangrijkste beperking
Atlantis	1D verticaal; mechanisch en 'grof' water-spanningsmodel	-veenoxidatie -compactie door grondwaterpeilverandering (isotache)	Regionale/nationale kaarten; lange tijdsperiode; Holocene pakket	Geen Darcy; geen krimp (of deels impliciet in oxidatie)
SUB-CR (Kooi e.a. 2018)	1D verticaal mechanisch; 3D grondwaterstroming	Compactie door grondwaterpeilverandering en stijghoogteverandering (isotache)	Regionale, relatief diepe (5 -1000 m) grondwatersystemen; invloed onttrekkingen	Ongeschikt voor grote freatische verlagingen; geen oxidatie/krimp
D-Settlement (Deltares, 2019)	1D verticaal mechanisch; 1.5D grondwaterstroming; grondspanning 2D	Compactie door belasting aan maaiveld (isotache of oudere compressie-modellen)	Lokaal; zetting door ophogingen/kunsten werken; verticale drainage	Onpraktisch/ongeschikt voor onttrekkingen of tijdsafhankelijk freatisch niveau; geen oxidatie/krimp
FlexPDE (FlexPDE, 2019)	1D verticaal mechanisch en grondspanning; 2D grondwaterstroming;	Compactie door belasting aan maaiveld en freatische of stijghoogteverandering (isotache)	Lokaal; zetting door ophogingen en bodemdaling door variaties freatisch niveau en/of stijghoogte	Ongeschikt voor grote freatische verlagingen; geen oxidatie/krimp
Plaxis (Plaxis, 2019)	2D mechanisch en grondwaterstroming	Compactie/deformatie door vrij algemene externe/interne belastingen (2D softsoil creep)	Lokaal; 2D geotechnisch; situaties met meerdimensionale deformatie en stroming	Geen oxidatie/krimp

Tabel 1 Overzicht van een aantal softwarepakketten die in Nederland worden gebruikt om ondiepe bodemdaling door compactie en/of oxidatie te voorspellen.

De concepten en principes waar de berekeningen van de bodemdaling in deze pakketten op berusten zijn te omvangrijk om in deze Deltafact samen te vatten.

Atlantis wordt gebruikt voor de vervaardiging van bodemdalingskaarten voor de provinciale (Zuid Holland) en nationale klimaateffect atlanten. Dit software pakket is hoofdzakelijk gericht op lange-termijn prognoses (decennia) voor scenario's van peilbeheer. Het is het enige pakket in Tabel 1 waarin bodemdaling door oxidatie is opgenomen. SUB-CR wordt, in combinatie met MODFLOW of iMOD, gebruikt voor de

modellering van bodemdaling door grondwateronttrekkingen op regionale schaal (tientallen tot duizenden km²). De andere drie pakketten zijn gericht op meer fjnischaligere toepassingen, met een groot oplossend vermogen voor spanningen, stroming en vervormingen binnen bodemlagen.

Voor de mechanische processen (compactie) wordt in alle pakketten inmiddels gerekend met de zogenaamde 'isotache model' die 2008 het standaard rekenmodel is geworden voor zettingsberekeningen in de ingenieurspraktijk (Den Haan, 2003). De isotache methode vervangt de methode 'Koppejan' die lang de standaard was, maar die grote beperkingen kent om gebruikt te worden voor de tijdsafhankelijke belastingen die relevant zijn bij bodemdaling.

Berekening en modellering van bodemdaling door rijping

Door Zuur (1958) is uit empirisch onderzoek als maat voor de rijping de waterfactor N geïntroduceerd:

$$N = (A - 20) / (L + 3H) \quad (2)$$

waarin A = watergetal = totaal-watergehalte, L = lutumgehalte en H = organische stof gehalte. A, L en H in g per 100 g droge grond. Hierbij wordt het watergehalte A bepaald aan verzadigde (vochtspanning = 0) grond. Door (Pons en Zonneveld, 1965) is deze factor verder verfijnd tot de rijpingsfactor n:

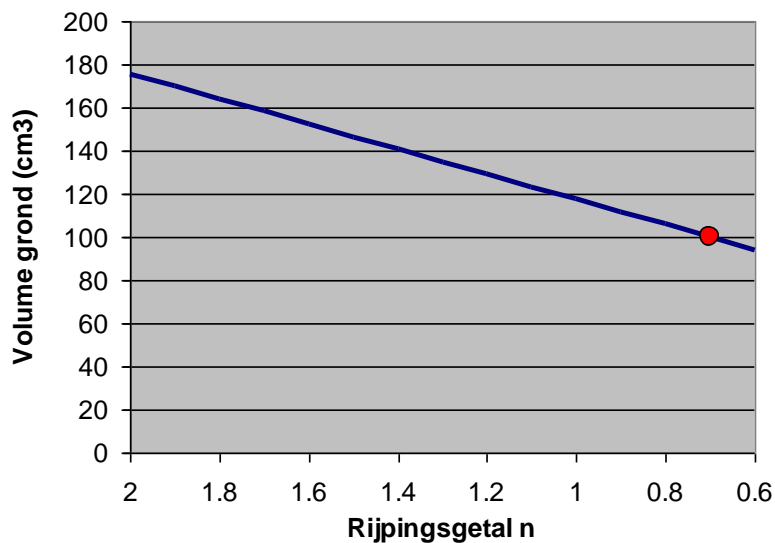
$$n = (A - 0,2 R) / (L + bH) \quad (3)$$

waarin R = zand en silt in g per 100 g droge grond, $R = 100 - H$, L, b = verhouding van het water absorberend vermogen van de organische stof t.o.v. lutum, waarbij b = 3 bij humus en veraard veen, en b = 6 bij weinig verweerd veen.

Door Pons en Zonneveld (1965) wordt een classificatieschema gegeven voor rijpende gronden (Tabel 2; Figuur 11).

n-factor	Classificatie	Omschrijving
<0.7	Gerijpt	kleeft niet aan de handen, niet kneedbaar
0.7 – 1.0	Vrijwel gerijpt	vrij stevig, kleeft een beetje, niet gemakkelijk kneedbaar
1.0 – 1.4	Half gerijpt	Redelijk zacht, kleeft, gemakkelijk kneedbaar
1.4 – 2.0	Vrijwel ongerijpt	zacht, kleeft erg, zeer gemakkelijk kneedbaar
> 2	Ongerijpt	zeer slap, bijna vloeibare modder

Tabel 2 Classificatie van de rijpingsfactor n volgens Pons en Zonneveld (1965).



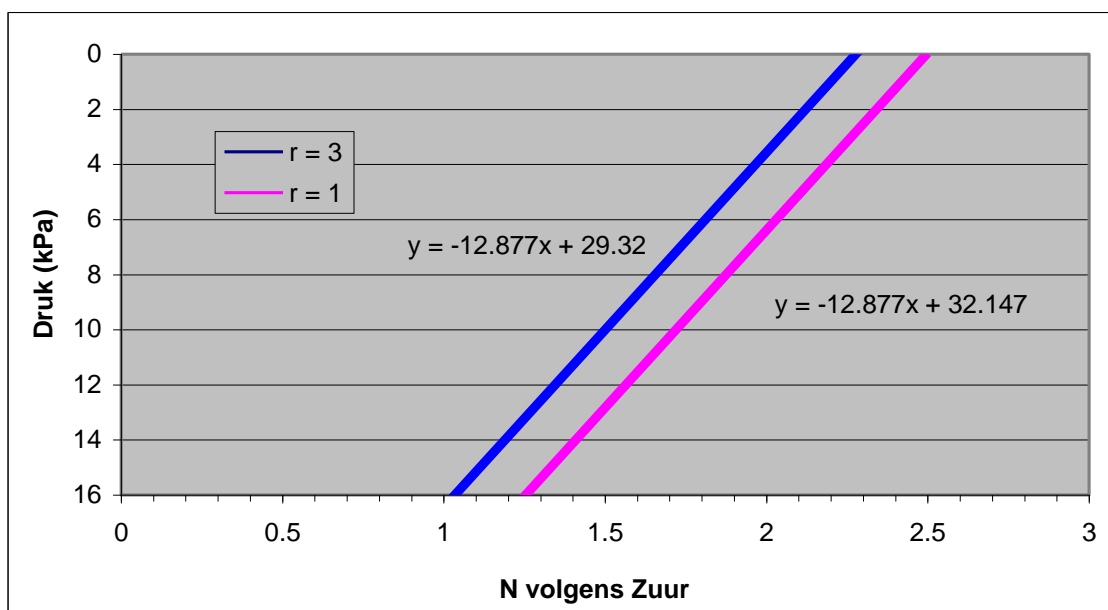
Figuur 11 Afname volume grond door rijping. Het betreft een kleigrond met 35% lutum en 5% organische stof. Bij volledig ongerijpte grond ($n = 2$) is het volume 176 cm³. Na volledige rijping ($n = 0,7$) is het volume teruggebracht tot 100 cm³.

Bij rijping wordt in eerste instantie het verlies aan volume (water) volledig omgezet in daling van het maaiveld. Op een bepaald moment wordt de grond steviger en treedt scheurvorming op en wordt uiteindelijk de verdere volumevermindering voor ongeveer 1/3 omgezet in maaiveld daling en voor 2/3 in scheuren. Door het eigen gewicht van de grond worden op enige diepte de scheuren deels dichtgedrukt (Rijniersce, 1983) en wordt de maaiveld daling wat groter en het aandeel in het volume scheuren kleiner. De rijpingsscheuren zijn vrij stabiel en zijn in de IJsselmeerpolders nog steeds te vinden. In een onderzoek in 2010 (Projectbureau Oostvaarderswold, 2010) zijn profielkuilen gegraven en blijken de scheuren nog steeds aanwezig te zijn en nog steeds zorg te dragen voor zeer grote horizontale doorlatendheden van de ondergrond. Volgens verschillende auteurs (Groen, 1997, Rijniersce, 1983, Wolters, 1996) gaat de rijping en de scheurvorming tot ca. 10 cm onder de drainagebuizen.

Door Rijniersce (1983) zijn resultaten van de metingen aan de zakkingsvelden in Zuidelijk Flevoland gebruikt om een relatie te leggen tussen de druk uitgeoefend door de bovenliggende grond en de waterfactor N (Zuur, 1958). Dit is gebaseerd op metingen aan scheurdiepten, volumegewichten en de parameters nodig voor de berekening van de rijping. Deze relaties voor de grens waar bij een bepaalde druk scheurvorming gaat optreden zijn gegeven in Figuur 12. Bij de berekeningen gaan we uit van de grens waarbij de rijpingskrimpt isotroop is (in alle richtingen even groot). In Figuur 12 wordt dit aangegeven met de blauwe lijn met de vergelijking:

$$y = -12,877x + 29,32 \quad (4)$$

waarin y de druk in kPa is en x de waterfactor N (Zuur, 1958).



Figuur 12 Links van de blauwe lijn krimpt de kleigrond door rijping alzijdig en wordt het volume aan rijpingskrimpt verdeeld over de maaiveldddaling (1/3 deel) en toename van het volume aan rijpingscheuren (2/3 deel). Rechts van de roze lijn wordt alle rijpingskrimpt omgezet in maaiveldddaling. De grond is te slap om het gewicht van de bovenliggende grond te dragen. Tussen de lijnen ligt een overgangsgebied.

De relatie x en y kan ook worden geschreven als:

$$x = -0,07766y + 2,277 \quad \text{of} \quad N_{cr} = 0,07766 G + 2,277 \quad (5)$$

waarin N_{cr} = de waterfactor waarbij de scheurvorming begint en G = de druk door het gewicht van de bovenliggende grond in kPa.

Met behulp van N_{cr} kan vervolgens het volume V_{cr} (cm^3) van 100 gram grond worden berekend op het moment van scheuren:

$$V_{cr} = N_{cr} (L + 3H) + 20 + 100 / \rho_s \quad (6)$$

Waarin ρ_s het specifiek volumegewicht in g/cm³ berekend uit de percentages lutum L, humus H en resterende minerale delen R (zand en silt) met specifieke volumegewichten van respectievelijk 2,7; 1,47 en 2,65 g/cm³.

Op dezelfde manier wordt voor de actuele waterfactor N_{nu} het volume V_{nu} (cm³) van 100 gram grond berekend:

$$V_{nu} = N_{nu} (L + 3H) + 20 + 100 / \rho_s \quad (7)$$

Uit het volume van de grond op het moment van scheuren V_{cr} en het huidige volume V_{nu} kan het actuele relatieve oppervlakte van de grond (pedon) en de scheuren worden berekend:

$$RO_{nu} = (V_{nu} / V_{cr})^{2/3} \quad (8)$$

$$SF_{nu} = 1 - RO_{nu} \quad (9)$$

Waarin RO_{nu} het relatieve oppervlakte op dit moment en SF_{nu} de scheurfractie.

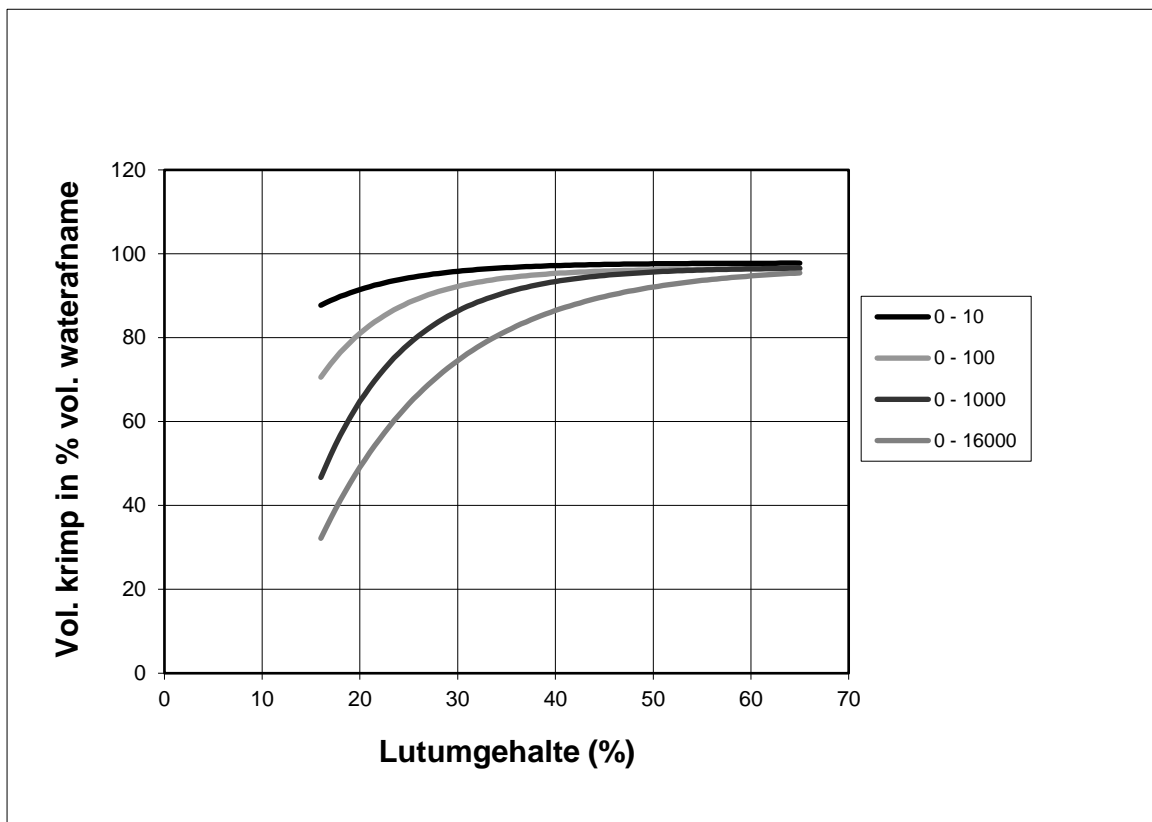
Berekening bodemdaling door krimp van kleigronden

De basis van de berekening van bodemdaling door krimp is de hoeveelheid water die aan de grond wordt onttrokken door verdamping en welk deel van dit volume water wordt omgezet in volume krimp. Om een indruk te krijgen over de grootte van krimp en wateronttrekking aan verschillende kleigronden is voor de serie gerijpte kleien, gegeven door Bronswijk en Vermeer (1987, 1990), de krimp en de wateronttrekking tussen een waterdruk van 0 en -1000 en -16000 cm nader beschouwd. Een vochtspanning van -16000 cm waterdruk is het zogenaamde verwelkingspunt, waarbij plantenwortels geen vocht meer aan de grond kunnen onttrekken.

Het lutumgehalte (in het onderzochte traject tussen de 18% en 65%) blijkt weinig invloed te hebben op de hoeveelheid water die wordt onttrokken bij daling van de waterdruk van 0 naar -1000 cm en naar -16000 cm (respectievelijk 0.1 m³/m³ en 0.25 tot 0.35 m³/m³). In Figuur 13 is aangegeven welk deel van het waterverlies resulteert in krimp bij vochtspanningsverlagingen van 0 tot respectievelijk -10, -100, -1000 en -16000 cm waterdruk. Het lutumgehalte blijkt een grote invloed te hebben op de krimpeigenschappen van kleigrond. De krimp komt voor meer dan 90% overeen met de wateronttrekking bij een daling van de waterdruk van 0 naar -1000

cm in kleien met een lutumgehalte hoger dan ca. 35%. Bij lichtere klei komt een aanmerkelijk groter deel van het water vrij zonder dat dit resulteert in krimp doordat in de aggregaten lucht de plaats van het water gaat innemen. Bij verdere daling van de waterdruk tot -16000 cm blijft alleen in de kleien met een lutumgehalte >45% de krimp voor meer dan 90% gelijk aan het waterverlies.

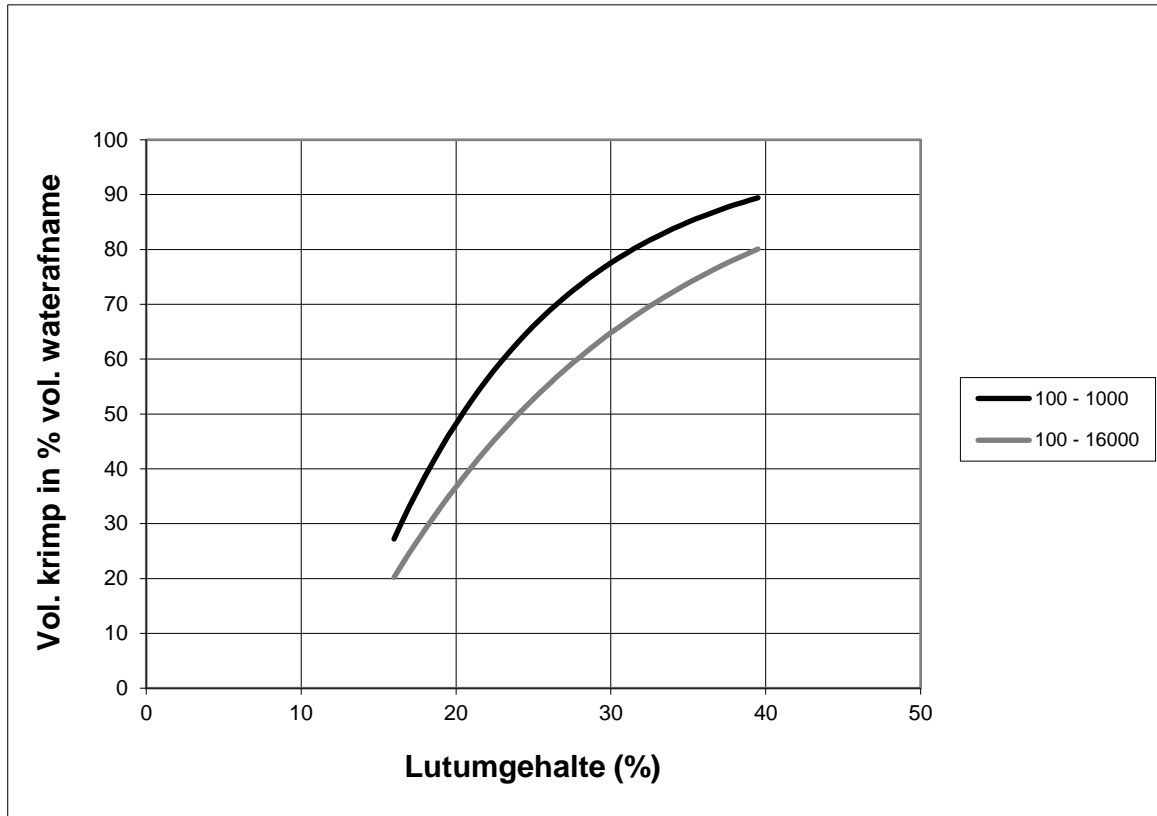
In het algemeen is de beginvochtspanning echter niet 0 en/of wordt de grond door bovenliggende lagen belast. Een betere inschatting van het deel van het waterverlies dat in krimp wordt omgezet volgt dan uit Figuur 14, waarin het waterverlies en de krimp bij een verlaging van de vochtspanning van -100 naar respectievelijk -1000



Figuur 13 Volume krimp als percentage van de afname van het watervolume bij verlaging van de vochtspanning van 0 naar respectievelijk -10, -100, -1000 en -16000 cm waterdruk in relatie tot het lutumgehalte.

en-16000 cm waterdruk wordt beschouwd. Deze figuur geeft een goede indicatie van het deel van het waterverlies dat in krimp wordt omgezet bij sterke (tot -1000 cm waterdruk) en zeer sterke (tot -16000 cm waterdruk) uitdroging van kleigrond. Uit een vergelijking van de Figuren 13 en 14 blijkt dat in het geval van een belaste kleigrond het percentage wateronttrekking dat in krimp wordt omgezet kleiner is dan in onbelaste toestand. Bij een zware klei met 50% lutum is dit echter nog

steeds meer dan 90%. De gepresenteerde curven in de Figuren 13 en 14 maken samen met een waterretentiekarakteristiek gecombineerd met een modelberekening met een watermodel zoals SWAP een schatting van de maaiveldddaling en toename van het scheurvolumen door krimp door uitdroging mogelijk.



Figuur 14 Volume krimp als percentage van de afname van het watervolume bij verlaging van de vochtspanning van -100 tot respectievelijk -1000 en -16000 cm waterdruk in relatie tot het lutumgehalte.

De krimp en daarmee ook de maaiveldddaling en de scheurvorming is in principe reversibel, echter zowel de waterretentiecurve als de zwelcurve kennen hysteresis en hebben een zekere tijd nodig om de potentiële zwel ook te realiseren.

Berekening bodemdaling door veenoxidatie

In een systeem waarbij de ontwateringsdiepte min of meer constant wordt gehouden door periodieke polderpeilverlagingen die de maaiveldddalingen volgen, zal op den duur de gemiddelde maaiveldddaling per jaar ongeveer constant worden. Op de lange termijn is daarbij oxidatie de belangrijkste component van de maaiveldddaling. Met resultaten van monitoring van maaiveldddaling kunnen langjarige maaiveldddaling worden bepaald. Gecombineerd met resultaten van

monitoring van de grondwaterstanden en slootpeilen kunnen relaties tussen slootpeilen c.q. grondwaterstanden en maaiveld dalingen worden vastgesteld (Van den Akker et al., 2007). Deze empirische relaties zijn bepaald voor de gemiddelde zomergrondwaterstand 'GWS zomer', de GLG (Gemiddeld Laagste Grondwaterstand) en de GLG8. Daarbij is 'GWS zomer' het gemiddelde van de zomergrondwaterstanden (1 april – 30 september). Naast de gebruikelijke GLG is de GLG8 gedefinieerd. Bij de berekening van de normale GLG wordt eerst bij een meetreeks van tweewekelijkse grondwaterstandsopnamen het gemiddelde bepaald van de 3 laagste standen (LG3) in een hydrologisch jaar (1 april – 31 maart). De GLG is dan de over ten minste 8 jaar gemiddelde waarde van LG3. De GLG8 is het gemiddelde van de drie diepste grondwaterstanden in die langjarige meetreeks. De GLG8 is dus duidelijk lager dan de GLG. Deze GLG8 is geïntroduceerd omdat wordt aangenomen dat diepe grondwaterstanden die af en toe in een langere reeks van jaren optreden, een onevenredig grote invloed op de maaiveld daling hebben omdat dan "vers" veen wordt aangesneden. Voor het bepalen van de regressievergelijkingen is onderscheid gemaakt tussen veengronden met een dun kleidek (< 40 cm) en veengronden zonder kleidek (kleidek < 10 cm). Door bij de opstelling de van de regressielijnen het effect van het kleidek te introduceren als een correctie op de algemene regressievergelijking is de volgende serie vergelijkingen bepaald:

De relaties tussen maaiveld dalingen (in mm) en GLG8 respectievelijk GLG en GWS zomer (in m -mv) worden dan:

Bij veengronden zonder kleidek:

$$\text{Maaiveld daling per jaar} = 34,188 \text{ GLG8} - 17,15 \quad (10)$$

$$\text{Maaiveld daling per jaar} = 23,537 \text{ GLG} - 6,68 \quad (11)$$

$$\text{Maaiveld daling per jaar} = 24,965 \text{ GWSzomer} - 3,44 \quad (12)$$

Bij veengronden met kleidek (< 40 cm):

$$\text{Maaiveld daling per jaar} = 34,188 \text{ GLG8} - 19,39 \quad (13)$$

$$\text{Maaiveld daling per jaar} = 23,537 \text{ GLG} - 10,47 \quad (14)$$

$$\text{Maaiveld daling per jaar} = 24,965 \text{ GWSzomer} - 7,79 \quad (15)$$

Voor de relatie tussen slootpeilen en maaiveldddaling kon gebruik worden gemaakt van een groter aantal monitoringsdata. De relaties tussen maaiveldddalingen (in mm) en het slootpeil (in m -mv), oftewel de drooglegging zijn:

Bij veengronden zonder kleidek:

$$\text{Maaiveldddaling per jaar} = 15,455 \text{ Slootpeil} + 2.75 \quad (16)$$

Bij veengronden met kleidek (< 40 cm):

$$\text{Maaiveldddaling per jaar} = 15,455 \text{ Slootpeil} - 3.53 \quad (17)$$

Uit de monitoring van maaiveldddalingen van veenweidegebieden blijkt dat de maaiveldddaling naar schatting voor 80% wordt bepaald door de grondwaterstanden aan het einde van de zomer, wanneer de grondwaterstanden op zijn diepst zijn en de bodemtemperatuur op zijn hoogst. Op dat moment zijn de omstandigheden voor vertering optimaal. Natuurlijk wordt de grondwaterstand sterk bepaald door de slootpeilen. Daarnaast spelen echter ook verdamping, neerslag, doorlatendheden, slootafstanden, kwel en inzijing een grote rol. Door al deze invloeden zijn de verschillen in maaiveldddalingen bij eenzelfde slootpeil groot. Bij de diepste grondwaterstanden zijn al deze invloeden en het slootpeil verdisconteerd en wordt de maaiveldddaling direct gerelateerd aan de oorzaak van de maaiveldddaling. Maaivelddalingsberekeningen gebaseerd op de grondwaterstanden verdienen daarom de voorkeur boven berekeningen op basis van het slootpeil.

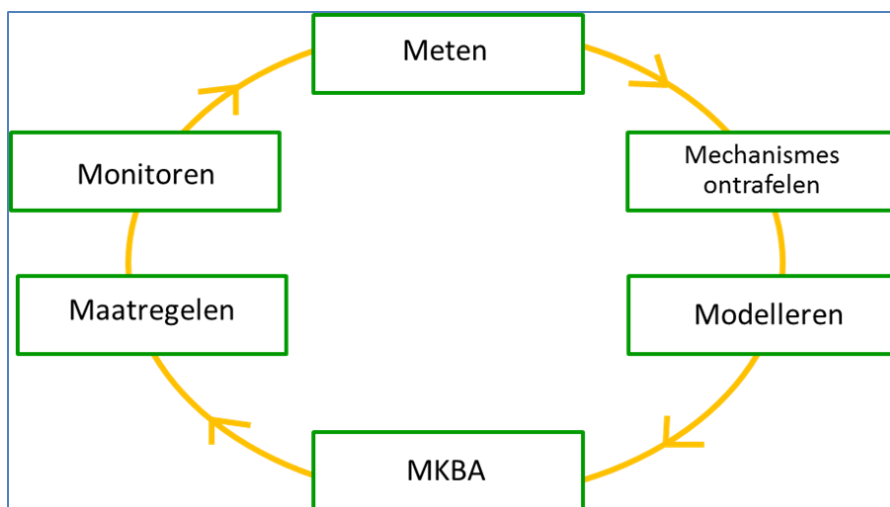
Modelberekeningen voor de bepaling van de bodemdaling door rijping, krimp en oxidatie.

De vergelijkingen in de voorgaande paragrafen over bodemdaling door rijping, krimp en oxidatie worden allemaal bepaald door de hydrologie: het waterbeheer stuurt in hoge mate de bodemdaling in veengebieden. Dit geldt ook voor gebieden waar nog rijping van klei kan plaatsvinden. Rijping en krimp worden sterk bepaald door de mate van uitdroging van de grond. De modellering van bodemdaling is daarom in de eerste plaats een hydrologische modelering waarbij de gewasverdamping een belangrijke rol speelt. Voor de modelberekeningen voor bodemdaling door oxidatie zou feitelijk de afbraak moeten worden gemodelleerd, maar momenteel worden de empirische relaties (10) t/m (17) gebruikt.

5. HANDELINGSPERSPECTIEVEN

Na het meten en modelleren van bodemdaling is er een beeld verkregen van wat er aan de hand is. Maar daarmee is het nog niet duidelijk of de bodemdaling ook tot problemen leidt. En zo ja, welke maatregelen kunnen genomen worden? En hoe kunnen deze geïmplementeerd worden?

In de context van bodemdaling worden voor deze verschillende te doorlopen stappen of fases de 6 'M's van meten, mechanismes ontrafelen, modelleren, MKBA, maatregelen en monitoren gehanteerd (Figuur 15). Na het vaststellen van bodemdaling, het begrijpen van de onderliggende mechanismes en het voorspellen, kan een risico-analyse of schade-analyse inzicht bieden in de gevolgen van bodemdaling: hoe erg is het? Hierna kan worden nagedacht over mogelijke maatregelen. Deze maatregelen kunnen vervolgens in een maatschappelijke kosten-baten analyse (MKBA) op economische rationale worden onderzocht, en verder uitgewerkt in termen van maatregelen en monitoring.



Figuur 15 De 6 M's; voor toelichting zie tekst.

Gevolgen van bodemdaling/ MKBA

Als gevolg van bodemdaling kunnen diverse maatschappelijke functies onder druk komen te staan. Voor er stappen worden gezet richting maatregelen, moet er eerst een beeld worden gevormd van hoe erg dat is: wat is de verwachte schade, en voor wie? Te denken valt hierbij aan directe schade aan publieke en private infrastructuur, panden en indirect aan meer overstromingsrisico en gevolgen voor natuur. In Born et al. (2016) wordt voor een groot deel van Nederland een eerste

indicatie gegeven van te verwachten schade door bodemdaling: met name schade aan funderingen en infrastructuur kan flink oplopen. Als vervolgens op locatie een beslissing of keuze moet worden genomen over beleid, kan een MKBA van de voorgestelde maatregelen inzicht bieden in de economische rationale van hiervan. Dit wordt bijvoorbeeld gedaan voor de binnenstad van Gouda een MKBA (Kok, 2017).

Implementatie van maatregelen

Afhankelijk van of het om landelijk of stedelijk gebied gaat en van het mechanisme van bodemdaling zijn verschillende maatregelen om schade of bodemdaling tegen te gaan mogelijk – te denken valt bijvoorbeeld aan onderwaterdrainage, peilverhoging, lichte ophoogmaterialen voor infrastructuur. Kennis over en praktijkervaringen met maatregelen worden verzameld op www.slappebodem.nl, en verder ontwikkeld in het Nationaal Kennisprogramma bodemdaling.

Bodemdaling wordt, door de hoge mate van complexiteit met zowel interne als externe afhankelijkheden in het socio-technisch systeem en de betrokkenheid van verschillende actoren, een steeds belangrijker (en gevoeliger) onderwerp binnen beleidsontwikkeling. Daarom is het belangrijk om, naast de fysische impact van bodemdaling, goed rekening te houden met de governance van bodemdaling. Hier zijn verschillende methodieken voor ontwikkeld, zoals governance handelingsperspectieven (Hommes et al. 2018a) en adaptatiepaden (Hommes et al., 2018b).

6. PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK

In Nederland zijn er over de laatste jaren steeds meer (kennis)projecten opgezet op het gebied van bodemdaling. De verschillende lokale en regionale projecten zijn geïnventariseerd door het Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling. De resulterende projectenlijst is te vinden op:
<http://www.kennisprogrammabodemdeling.nl/home/projecten/>.

7. KENNISLEEMTES

Hieronder worden beknopt kennisleemtes rondom bodemdaling toegelicht.

Processen

- Veenafbraak: invloed type veen, invloed omgevingsfactoren, invloed microbiologie aerob versus anaerobe afbraak, massaverlies in loop van de tijd.
- Relatie tussen uitstoot van broeikasgassen en dynamiek van freatische grondwaterstand.
- Relatie tussen mate van humificatie van veen en gevoeligheid voor compactie.
- Mate van krimp en zwel in verschillende klei- en veengronden.
- Bijdrage van kruip in Holocene klei- en veenlagen aan maaiveld daling (metingen voor validatie)
- De bijdrage van grondwateronttrekkingen/bemalingen aan bodemdaling in Nederland

Methoden

- Ontwikkelen van een methode om bodemdaling op regionale schaal met hoge nauwkeurigheid (mm-schaal) vlakdekkend te meten.
- Methoden om geotechnische bodemeigenschappen (isotacheparameters en doorlatendheid) te kunnen schatten op plaatsen waar geen geotechnische metingen voor handen zijn, en met voldoende nauwkeurigheid om de onzekerheid in bodemdalingsprognoses te verkleinen naar een praktisch bruikbaar niveau.

Modellen

- Ruimtelijk model (bijv. wijkschaal) waarin flexibel kan worden gerekend met ondergrondse infrastructuur, ingrepen in de (grond)waterhuishouding en belasting, en met oxidatie.
- Wat betreft bodemdaling door rijping, krimp/zwel en oxidatie is enerzijds al veel kennis aanwezig, maar uiteindelijk wordt veel empirische kennis gebruikt om de stap van hydrologische modellering naar de berekening van de bodemdalingen te maken. Een gemis daarbij is dat de metingen en monitoringen waarop de empirische relaties zijn gebaseerd nogal beperkt zijn. Daarnaast kunnen de empirische relaties door klimaatverandering buiten hun gebruiksgebied komen. Een voorbeeld daarvan zijn mogelijk de relaties tussen bodemdaling door oxidatie en grondwaterstanden, omdat temperaturen hoger worden en neerslagpatronen veranderen. Voor de modellering van bodemdaling zijn daarom ook het laatste traject van vochttoestand naar effect op bodemdaling verbetering van procesmodellen noodzakelijk. Dit houdt ook in dat meer data van bodemeigenschappen zoals afbraakcoëfficiënten en krimpkarakteristieken etc. nodig zijn.

8. BRONNEN & LINKS

- Akker, J.J.H. van den, J. Beuving, R.F.A. Hendriks en R.J. Wolleswinkel, 2007. 5510 Maaiveld daling, afbraak en CO₂ emissie van Nederlandse veenweidegebieden. Leidraad Bodembescherming, afl. 83, Sdu, Den Haag, 32 p.
- Akker, J.J.H. van den, T. Hoogland, H.A.M. Hakvoort, A. Roelevink, A.A. Veldhuizen, 2011. Verbetering watersysteemmodellering: Kleischeuren. Rapport HKV-LIJN IN WATER PR2049, 62 p.
- Akker, Jan J.H. van den, Tom Hoogland, Hans Hakvoort en Frederik Stoppelenburg, 2011. Berging in kleischeuren in de Flevopolders. Stromingen 16 (2011), nummer 3, blz. 15 – 31.
- Beuving, J., van den Akker, J.J.H., 1996. *Maaiveld daling van veengrasland bij twee slootpeilen in de polder Zegveldbroek. Vijfentwintig jaar zakkingsmetingen op ROC Zegveld*. Wageningen, Staring Centrum DLO, Rapport 377.

- Born, G.J. van den et al. (2016). *Dalende bodems, stijgende kosten*, Den Haag: PBL.
- Bronswijk, J.J.B. and J.J. Evers-Vermeer, 1987. Krimpkaracteristieken van kleigronden in Nederland. Wageningen, ICW-rapport 22. 58 p.
- Bronswijk, J.J.B. and J.J. Evers-Vermeer, 1990. Shrinkage of Dutch clay soil aggregates. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 38: 175-194.
- Cultuurtechnische vereniging, 1988. *Cultuurtechnisch Vedemecum 1988*. ISBN 90-9002366-6.
- Deltares, 2019. <https://www.deltares.nl/nl/software/d-settlement/>.
- Den Haan, E.J., 2003. Het a,b,c-isotache model: hoeksteen van een nieuwe aanpak van zettingsberekeningen. *Geotechniek* 4 (oktober), 28-35.
- Erkens, G., H. Kooi, 2018. *Verkenning bodemdaling in Midden-Delfland*. Deltares rapport 11200151-002.
- FleXPDE, 2019. <https://www.pdesolutions.com/>.
- Hijma, M., H. Kooi, 2018a. *Bodemdaling in het kustfundament en de getijdebekkens*. Deltares rapport 11200538-008-ZKS-0001.
- Hijma, M., H. Kooi, 2018b. *Bodemdaling in het kustfundament en de getijdebekkens (deel 2)*. Deltares rapport 11202190-001-ZKS-0001.
- Hommes, S., Ellen, G.J., Sardjoe, N., Voorberg, W., Ykema, J. (2018a). *Governance handelingsperspectieven bodemdaling*. Deltares rapport 11201665-002-BGS-0002, Uitvoeringsprogramma Bodem & Ondergrond, zie: <https://www.bodemplus.nl/onderwerpen/bodem-ondergrond/bodemconvenant/publicaties/downloads/kennis/methodiek-aanpak/>.
- Hommes, S., Ellen, G.J., Seijger, C. (2018b). *Aanpak bodemdaling Gouda – uitkomsten governance spoor*. Deltares rapport 1230530-002-BGS-0004.
- Kooi, H., Johnston, P., Lambeck, K., Smither, C., Molendijk, R., 1998. *Geological causes of recent (~ 100 yr) vertical land movement in the Netherlands*. *Tectonophysics* 299, 297-316.
- Kooi, H., 2000. *Land subsidence due to compaction in the coastal area of The Netherlands: the role of lateral fluid flow and constraints from well-log data*. *Global and Planetary Change* 27, 207-222.
- Kooi, H., 2008. *Compactiebijdragen aan bodemdaling langs de kust*. In: Barends e.a. (editors). *Bodemdaling langs de Nederlandse kust*. IOS Press. p. 19-28.

- Kooi, H., M. Bakr, G. de Lange, E. den Haan, G. Erkens, 2018. *User guide to SUB-CR; a MODFLOW package for land subsidence and aquifer system compaction that includes creep*. Deltares report 11202275-008, 63 p.
- Kok, S., 2018. *Quick-scan MKBA bodemdaling binnenstad Gouda – een eerste verkenning naar de kosten en baten van handelingsperspectieven voor bodemdaling*. Deltares rapport 1230530-002-BGS-0005.
- Meckel, T.A., U.S. ten Brink, S.J. Williams., 2006. *Current subsidence rates due to compaction of Holocene sediments in southern Louisiana*. Geophysical Research Letters 33, L11403.
- Plaxis, 2019. <https://www.plaxis.com/>.
- Pleijter, M., van den Akker, J.J.H., 2007. *Onderwaterdrains in het veenweidegebied. Toelichting op de methode en meetinrichting*. Alterra rapport 1586, Wageningen, 2018.
- Pons, L.J. and I.S. Zonneveld, 1965. Soil ripening and soil classification. ILRI publ. no. 13, Wageningen.
- Projectbureau Oostvaarderswold, 2010. *Scheurvorming in de Almerelaag Oostvaarderswold*. Arcadis.
- Verruijt, A., 2001. *Grondmechanica*. Technische Universiteit Delft.
- Rijniersce, K., 1983. Een model voor de simulatie van het fysische rijpingsproces van gronden in de IJsselmeerpolders. Van Zee tot Land nr. 52, Lelystad. Dissertatie Universiteit Wageningen.
- Schothorst, C.J., 1966. Klink van veengrond na diepere ontwatering. Instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding no. 38, 9 pp.
- Stouthamer, E., S. van Asselen, 2015. *Drivers of delta subsidence*. E-proceeding of the 36th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, The Hague, The Netherlands, 2015.
- von Post, L. (1924): *Das genetische System der organogenen Bildungen Schwedens*. Comité international de Pédologie IV. Communication 22: 287-304.
- Wolters, H.A. 1996, *Neerslag en afvoer in het landelijk gebied van Flevoland*, Flevovericht nr. 357, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied, Lelystad.
- Zuur, A.J., 1958. *Bodemkunde der Nederlandse bedijkingen en droogmakerijen. Deel C. Het watergehalte, de indroging en enkele daarmee samenhangende processen*. Coll. dictaat. LUW – Wageningen.

Deze Deltafact is opgesteld door Deltares en Wageningen University & Research - Wageningen Environmental Research (september 2019)

Auteurs:

Sanneke van Asselen (Deltares)

Henk Kooi (Deltares)

Jan J.H. van den Akker (Wageningen University & Research - Wageningen Environmental Research)

9. DISCLAIMER

De in deze publicatie gepresenteerde kennis en diagnosemethoden zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteur(s) en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit deze publicatie.