

1 Bodemdaling - Kernvragen

Versie: 2024-09-28

1.1 Welke methoden kunnen worden toegepast voor het meten van bodembeweging?

In ons onderzoek passen we vijf hoofdmethoden toe: veldmeettechnieken (extensometer, waterpassen en zakplaatjes) en twee zijn meettechnieken vanuit de lucht (LiDAR en InSAR).

Extensometer

Met de extensometers meet je de verticale bewegingen van de ondergrond op verschillende diepten. Zo kun je vaststellen hoeveel en op welke diepte de bodem omhoog of omlaag beweegt over de tijd. Het is zo goed na te gaan waar in de bodem de meeste vervorming plaatsvindt. Dit geeft inzicht in de processen die bodembeweging veroorzaken. Deze informatie is nodig bij het vinden van de juiste maatregelen om lange-termijn bodemdaling tegen te gaan. Extensometermetingen zijn belangrijke metingen die worden gebruikt voor het verbeteren van modellen om bodemdaling te voorspellen.

De methode heeft twee beperkingen:

- (1) Er wordt op maar één locatie gemeten (puntmeting).
- (2) Het bovenste anker van de extensometer wordt op een paar centimeter onder de graszode geplaatst, waardoor bodembeweging in de bovenste paar centimeter van de bodem niet wordt gemeten.

Waterpassen

Waterpasmetingen helpen ons om de gemiddelde hoogte van het maaiveld (het oppervlak van de grond) te bepalen en veranderingen in deze hoogte over de tijd te meten. Door met een waterpasinstrument op verschillende punten in een afgebakend gebied (bijvoorbeeld 50 bij 50 meter) te meten, kan de gemiddelde maaiveldhoogte en de verandering daarin tussen meetmomenten worden bepaald. Meestal worden er ongeveer 100 metingen per meetronde gedaan, wat ook inzicht geeft in de variabiliteit van bodemhoogte en bodemhoogteverandering binnen het bemeeten gebied.

De methode heeft twee beperkingen:

- (1) Het is arbeidsintensief en daarom wordt er niet zo vaak gemeten.
- (2) De metingen zijn momentopnamen. Hierdoor geven ze de situatie op een bepaald moment aan, waardoor de kans bestaat dat de hoogste en laagste maaiveldhoogten niet gemeten worden.

1	Bodemdaling - kernvragen
---	--------------------------

Zakplaatjes

De zakplaatjesmethode is een eenvoudige methode om bodemdaling op de lange termijn op een bepaalde plek vast te kunnen stellen. Bij deze methode meten we liefst tientallen jaren, steeds in dezelfde periode in het jaar, om jaarlijks verschillen in het weer zoveel mogelijk uit de metingen te filteren.

De methode heeft twee beperkingen:

- (1) Er wordt op maar één locatie gemeten (puntmeting).
- (2) De metingen zijn momentopnamen. Hierdoor geven ze de situatie op een bepaald moment aan, waardoor de kans bestaat dat de hoogste en laagste maaiveldhoogten niet gemeten worden.

Een alternatief voor een zakplaatjes meetopstelling is een *geodetische extensometer* waarbij zakplaatjes zijn gekoppeld aan GNSS-antennes. Deze meten de hoogte van het zakplaatje met hoge tijdsresolutie (bijvoorbeeld één keer per uur). Hiermee wordt momenteel getest binnen het NOBV.

LiDAR

Bij LiDAR wordt gebruik gemaakt van een laserscan meting vanuit de lucht voor het doen van vlakdekkende metingen (dekkend voor het hele gebied) van bodemhoogte en bodemhoogteverandering. De laserscanner zit vast aan een bewegend platform (drone, helikopter of vliegtuig) of aan een statief.

De methode heeft drie beperkingen:

- (1) Door de invloed van gewashoogte en onzekerheden van het systeem zelf (met name bij metingen vanaf een bewegend platform) zijn de schattingen onzeker.
- (2) Het zijn momentopnamen. Hierdoor geven ze de situatie op een bepaald moment aan, waardoor de kans bestaat dat de hoogste en laagste maaiveldhoogten niet gemeten worden.
- (3) Laser-aan-statiefmetingen zijn in de praktijk alleen uit te voeren op een relatief klein oppervlak (ongeveer 5 x 5 m).

InSAR

Ook de InSAR-methode is een meting vanuit de lucht, waarbij gebruik wordt gemaakt van radarsatellietbeelden. Hiermee kunnen op grotere schaal schattingen van bodembewegingen worden gemaakt. De methode meet met grotere frequentie in vergelijking met LiDAR. De tussenresultaten zijn veelbelovend voor het vlakdekkend schatten van bodembeweging in veenweidegebied.

De grootste uitdagingen van deze methode zijn op dit moment:

- (1) Het selecteren van een robuust en gelijkmatig netwerk van meetpunten in een landbouwgebied.
- (2) Het juist inschatten van de gegevens die nodig zijn om bodembeweging te berekenen voor percelen waarvan wordt aangenomen dat ze evenveel bewegen.
- (3) Rekening houden met veranderingen in de het waterbeheer.
- (4) De verwerkingstijd verkorten zodat berekeningen sneller zijn en het ontwikkelproces efficiënter maken.

1.2 Hoe groot is de bodemdaling in veenweidegebieden?

We schatten op basis van onze metingen en literatuurstudies in dat de bodemdaling in Nederlandse veenweidegebieden zo'n 5 tot 10 millimeter per jaar is. Lagere en hogere snelheden kunnen voorkomen in ruimte en tijd. Verschillen in snelheden worden veroorzaakt door wisselende lokale omstandigheden, zoals:

- De gemiddelde grondwaterstand en wisselingen hiervan
- Verschillen in waterdruk in de diepere ondergrond (stijghoogte)
- Belasting van de bodem in het verleden
- Ontwatering van de bodem in het verleden
- De bodemopbouw (zoals veentype en veendikte)
- Bepaalde bodemeigenschappen die invloed hebben op de samendrukbaarheid, zoals bijmenging van klei of zand,

Omdat deze factoren sterk verschillen in ruimte en tijd varieert de snelheid van bodemdaling per plek en in de tijd.

Om de lange-termijn bodemdaling, de 'onomkeerbare bodemdaling', op een bepaalde plek goed in te schatten is het belangrijk om lang te meten: het liefst meer dan 10 jaar. Zo kunnen we seizoensgebonden bodembeweging uit de metingen filteren, en een betrouwbare gemiddelde lange-termijn bodemdalingssnelheid schatten. De seizoensgebonden bodembeweging kan namelijk in een veengrond wel tien centimeter zijn.

In Zegveld, een bekende testlocatie, is de bodemdaling bepaald met de zogenaamde *zakplaatjesmethode*. Sinds het begin van de jaren 70 is met die methode ieder jaar de hoogte van de zakplaatjes op verschillende diepten in de ondergrond bepaald. De metingen tonen aan dat de bodemdaling voor een perceel met een lage waterstand in de omliggende sloot 5.8 millimeter per jaar was. Voor een perceel met een hoog slootwaterpeil was dit 4.8 millimeter per jaar. Het slootwaterpeil en daarmee het grondwaterpeil hebben dus een belangrijke invloed op de lange termijn bodemdaling.

Op vijf van onze NOBV testlocaties hebben we vier jaar lang bodemhoogtemetingen kunnen doen. Een eerste analyse van de metingen laat een gemiddelde bodemdalingssnelheid van tussen 2 en 7 millimeter per jaar zien.

Op basis van voorspellingsmodellen zijn landelijke voorspellingskaarten gemaakt voor de bodemdaling in Nederland. Die kaarten zijn online te vinden in de Klimaat-effectatlas en laten zien dat de snelheid van bodemdaling in Nederlandse veenweidegebieden zo'n 5.4 tot 6.8 millimeter per jaar is. De geschatte bodemdalingssnelheid hangt hierbij samen met de mate van verwachte klimaatopwarming van een gebied.

1.3 Wat is de seizoensgebonden bodembeweging in de veenweidegebieden en waardoor wordt deze bepaald?

Op vijf NOBV-meetlocaties hebben we, op basis van metingen met een *extensometer*, vastgesteld dat in de jaren 2019 tot en met 2023 de seizoensgebonden bodembeweging varieert tussen 15 en 98 millimeter per jaar. Dit betekent dat de jaarlijkse bodembeweging maximaal zo'n tien centimeter is. We hebben dit gemeten op ongeveer vijf centimeter onder het maaiveld.

De bodembeweging hangt af van lokale omstandigheden. Daarnaast kan de bodembeweging van jaar tot jaar variëren door verschillen in weersomstandigheden, zoals die in neerslag en temperatuur (wat van invloed is op de verdamping).

Vooral fluctuaties van de grondwaterstand bepalen de seizoensgebonden bodembeweging. Stijgt de grondwaterstand, dan beweegt de bodem meestal omhoog. Daalt de grondwaterstand, dan beweegt de bodem meestal omlaag. Bij grotere fluctuaties van de grondwaterstand zie je vaak ook een grotere bodembeweging. Verschillende factoren hebben invloed op de grondwaterstand, zoals:

- Het weer: neerslag en verdamping
- Bepaalde bodemeigenschappen, zoals waterdoorlatendheid, van de bodemlagen
- Afstand tussen de sloten
- Aanwezigheid van waterafvoer- en aanvoersystemen
- Verschillen in de druk van het grondwater onder het veenpakket (regionale grondwatersysteem en kwel/wegzijing)

Kijken we *boven* het grondwaterniveau, dan wordt seizoensgebonden bodembeweging vooral veroorzaakt door krimp van de bodem in het droge seizoen en zwel in het natte seizoen. Kijken we *onder* het grondwaterniveau dan wordt de seizoensgebonden bodembeweging vooral veroorzaakt door tijdelijke vervorming als gevolg van veranderingen in de grondwaterstand (poro-elastiche vervorming).

Vervormingen van de grond ontstaan door veranderingen in korrelspanning. Deze worden gedreven door veranderingen in de totaalspanning (totaalgewicht van de vaste delen van bovenliggende grondlagen) en de waterspanning. Als een de belasting op een slecht doorlatende laag als veen wordt aangebracht, wordt eerst de toename van de belasting volledig door het water in de poriën gedragen. Vervolgens wordt water langzaam uit de poriën verdreven, neemt het volume af en de korrelspanning geleidelijk toe totdat de belasting volledig door de korrels wordt gedragen. Tijdens dit proces is de korrelspanning toegenomen met de totaal opgebrachte belasting.

Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende (reversibele en irreversibele) bodembewegingsprocessen en waar deze zich afspelen in de bodem.

De bodemopbouw heeft ook invloed op de bodembeweging. Zo is de grootste seizoensgebonden bodembeweging tot nog toe gemeten door het NOBV op een plek met een zes meter dik veenpakket. Dit komt waarschijnlijk doordat er meer tijdelijke vervorming door variaties in waterdruk (poro-elastische vervorming) te verwachten is naarmate het veenpakket dikker is. Verschillende bodemtypen zijn in verschillende mate gevoelig voor krimp, zwel en elastische (omkeerbare) vervorming.

4	Bodemdaling - kernvragen
---	--------------------------

Tabel 1. Bodembewegingsprocessen in veengrond.

Reversibel of irreversibel	Waar in de bodem	Proces	Omschrijving
Irreversibel (onomkeerbaar)	Onverzadigde zone	Veenafbraak	Afbraak van organisch materiaal in de bodem door micro-organismen. De afbraak gaat snel als er zuurstof aanwezig is. Langzamere anaerobe afbraak (zonder zuurstof) kan voorkomen in de met water verzadigde zone.
		Krimp	Volumeafname van de bodem als gevolg van uitdroging, waarbij de zuigspanning toeneemt).
	Verzadigde zone	Consolidatie	Samendrukking van de bodem doordat het gewicht op de grond toeneemt en grondwater uit de poriën stroomt. Hierdoor neemt de waterdruk af en de korrelspanning (de druk op de vaste delen van de grond onderling) toe.
		Kruip	Het langzaam samendrukken van de grond waarbij de gronddeeltjes zich heroriënteren onder gelijkblijvende druk.
		Compactie	De samendrukking van de bodem ten gevolge van consolidatie en kruip.
Reversibel (omkeerbaar)	Onverzadigde zone	Krimp en zwel	Volumeafname (krimp) als gevolg van uitdroging en volumetoename (zwel) als gevolg van vernatting. Door uitdroging en vernatting van de bodem ontstaan er toe- en afnamen van de zuigspanning in de bodem.
	Verzadigde zone	Poro-elastische vervorming	Volumeafname en -toename van de bodem als gevolg van veranderingen in de waterdruk, waardoor ook de korrelspanning veranderd.

1.4 Welke processen bepalen langjarige bodembewegingen?

Verschillende metingen tonen aan dat de seizoensgebonden (omkeerbare) bodembeweging centimeters bedraagt: maximaal 10 centimeter. De langjarige (onomkeerbare) bodemdaling is zo'n vijf tot tien millimeter per jaar. Oftewel: de seizoensgebonden bodembeweging kan tot tien keer zo groot zijn als de langjarige bodemdaling. De volgende processen spelen (in verschillende mate) een rol bij bodembeweging en/of bodemdaling (zie ook Tabel 1):

- Krimp en zwel: door uitdroging krimpt de bodem en daalt het oppervlak. Door toename van de vochtigheid zwellt en stijgt de bodem weer. De mate waarin dit gebeurt kan verschillen. Een deel van de krimp kan onomkeerbaar zijn.
- Veenafbraak: afbraak van organische stof in veen vindt grotendeels plaats in het deel van de bodem dat zich boven het grondwaterniveau bevindt en is onomkeerbaar.
- Poro-elastische vervorming: door veranderingen van grondwaterstand of waterdruk in de diepere ondergrond veranderen ook de waterspanningen in de grond. Als de waterspanning daalt verliest de bodem wat volume omdat er grondwater wegstroomt. Als de waterspanning weer stijgt neemt het volume toe doordat er weer meer grondwater in de bodem komt. Zolang de veranderingen in waterspanning klein blijven is dit proces omkeerbaar.
- Compactie: Dit is het proces waarbij de bodem blijvend wordt samengedrukt. Twee processen leiden tot compactie: consolidatie en kruip. Beide worden hieronder toegelicht.
- Consolidatie: samendrukking van de bodem doordat het gewicht op de grond toeneemt en grondwater uit de poriën stroomt. Hierdoor neemt de waterdruk geleidelijk af en de korrelspanning (de druk op de vaste delen van de grond onderling) toe. Onomkeerbare samendrukking treedt op als de druk op de grond hoger wordt dan wat de bodem eerder heeft meegemaakt.
- Kruip: het langzaam samendrukken van de grond waarbij de gronddeeltjes zich heroriënteren onder gelijkblijvende druk. Kruip is een continu en in principe eindeloos proces.

De vraag welk deel van de onomkeerbare bodemdaling wordt veroorzaakt door welk proces is moeilijk te beantwoorden. Vrijwel altijd spelen er meerdere processen tegelijk en wisselt de bijdrage van elk proces in de tijd, bijvoorbeeld doordat de grondwaterstand varieert in de loop van de tijd. Ook het type veen, de dikte en eigenschappen van het veen en de tijdsperiode waar men naar kijkt zijn van invloed op de verschillende bodemdalingsprocessen.

6	Bodemdaling - kernvragen
---	--------------------------

1.5 Hoeveel draagt veenafbraak bij aan langjarige bodemdaling?

De bijdrage van veenafbraak aan langjarige bodemdaling hangt van verschillende factoren af. De verschillen in grondwaterstand spelen een belangrijke rol, net zoals de bodemopbouw en bodemeigenschappen en het weer. Een lagere grondwaterstand leidt bijvoorbeeld tot meer zuurstof in de bodem en dus tot meer bodemdaling door veenafbraak. Deze factoren zijn afhankelijk van plaats en tijd en veenafbraak is dat dus ook. Daarbij komt dat dezelfde factoren de snelheid van andere bodemdalingsprocessen bepalen.

Om al deze redenen kunnen we geen precieze getallen geven voor de bijdrage van veenafbraak aan bodemdaling. We kunnen deze bijdrage wel op verschillende manieren inschatten:

- Op basis van *bodembewegingsmetingen* op verschillende diepten in de ondergrond. Er wordt dan een aanname gemaakt over tot welke diepte en in welke mate er veenafbraak op kan treden.
- Op basis van regelmatige metingen van de koolstofvoorraden in de bodem.
- Op basis van schattingen van hoeveel *mechanische processen* bijdragen. Deze bijdragen worden geschat op basis van (1) bepalingen van hoeveel veen is samengedrukt, of (2) proeven in het laboratorium waarbij wordt bepaald hoe snel de bodem vervormt.

Eerste schattingen van het aandeel van veenafbraak aan totale bodemdaling in het Nederlandse veenweidegebied liggen, op basis van onze meetresultaten, tussen de 60 en 70%. Eerder onderzoek geeft een schatting van tussen de 50 en 80%. De verschillen in dit percentage worden veroorzaakt door de factoren die hierboven genoemd zijn. Het overige deel van de totale bodemdaling komt door het samendrukken van de bodem (vooral door kruip) en onomkeerbare krimp.

1.6 Welke omstandigheden bepalen de gevoeligheid van veen voor mechanische bodemdaling?

Met mechanische bodemdaling bedoelen we de daling van de bodem door fysische processen die de bodem samendrukken. We bedoelen dan onomkeerbare krimp, consolidatie en kruip.

Deze processen worden beïnvloed door de mate van samendrukbaarheid en dikte van het materiaal, variaties in grondwaterstand, de snelheid van veenaangroei en de belastingsgeschiedenis van het veen (welke druk er eerder heeft plaatsgevonden in de grond).

Het veentype heeft bepaalde eigenschappen; het kan bijvoorbeeld vezelig zijn van structuur of er kunnen restanten van bomen en takken in aanwezig zijn. Dit heeft ook invloed op de mate van mechanische bodemdaling. Bosveen met veel takken en boomstammen zal bijvoorbeeld minder snel vervormen dan een vezelige veensoort als zeggeveen.

Ook veenafbraak beïnvloedt mechanische bodemdaling. Bij dit proces wordt organisch materiaal afgebroken wat de bodemstructuur verandert. Een sterk afgebroken veentype kan makkelijker samengedrukt worden dan een vezelig veen dat nog nauwelijks is afgebroken.

In de onverzadigde grond boven het grondwaterpeil duiden we de vermindering van laagdikte aan met (irreversibele) krimp. Door uitdroging krimpt de bodem en daalt het grondoppervlak. Door bevochtiging en verzadiging stijgt de bodem weer. In de bodem zijn het kleigehalte en de kleisoort van belang, deze beïnvloeden de *zuigspanningen*.

Onomkeerbare bodemdaling door consolidatie gebeurt als de druk op de bodem hoger wordt dan deze eerder was: het overschrijden van de *grensspanning*. Deze grensspanning wordt bepaald door huidige of vroegere druk van de grond erboven en door veroudering. In veenweidegebieden is de grensspanning vaak 10% tot 20% hoger door veroudering en wisselende grondwaterstanden. De druk kan vooral toenemen door extra belasting, bijvoorbeeld bij bouwprojecten, of door het sterk verlagen van de grondwaterstand. Meestal is deze onomkeerbare vervorming door consolidatie nauwelijks van belang bij bodemdaling in veenweidegebieden omdat de grensspanning zelden overschreden wordt.

Kruip is een proces dat altijd doorgaat en de grond langzaam laat vervormen. Hoe dikker het veen, hoe meer bodemdaling door kruip er plaatsvindt. Ook de ouderdom van het veen heeft invloed: ouder veen vervormt langzamer. Naarmate de tijd verstrijkt, wordt de kruip langzamer.

8	Bodemdaling - kernvragen
---	--------------------------