

Memo

Datum

6 augustus 2024

Aantal pagina's

1 van 10

Contactpersonen

Henk Kooi & Gilles Erkens

Doorkiesnummer

+31(0)88 335 7366

E-mail

Henk.Kooi@deltares.nl

Onderwerp

Aanzet nieuw oxidatiemodel Regio Deal Groene Hart Bodemdaling (deliverable D2A)

1. Inleiding

Deze notitie betreft deliverable D2A in project 42 van de Regio Deal Bodemdaling Groene Hart.

Regio Deal GH Bodemdaling (RDGHB) project 42 richt zich op het modelinstrumentarium voor bodemdalingstoepassingen. Het project bevat drie lijnen: (1) verbetering van het geologisch model; (2) verbetering van procesmodellen; (3) verbeterde parametrisatie. Binnen lijn 2 is één van de taken om stappen te zetten naar een verbeterd model voor bodemdaling door (aerobe) oxidatie van organisch materiaal.

Deze memo bespreekt de huidige beperkingen en potentiële verbetermogelijkheden van de rekenwijze(n) voor bodemdaling door oxidatie. Dit levert de basis voor een visie op verdere modelontwikkeling. De focus ligt op rekenwijzen die bruikbaar zijn voor gebiedsdekkende modellering van maaiveldddaling door oxidatie over relatief grote arealen (~1 km² tot nationale schaal) en voor tijdsperioden van ca. 10 jaar tot eeuwen. Deze rekenwijzen/modellen worden met name ingezet voor de productie van bodemdalingsvoorspellingskaarten voor beleidsvraagstukken (effecten waterbeheer, landgebruik, klimaat).

De memo is opgesteld door Henk Kooi en Gilles Erkens (Deltares), met input van Guido Bakema en Jan van den Akker (WENR) en Sanneke van Asselen (Deltares).

2. Uitgangssituatie: *bestaande bodemdalingsmodellen voor veenoxidatie*

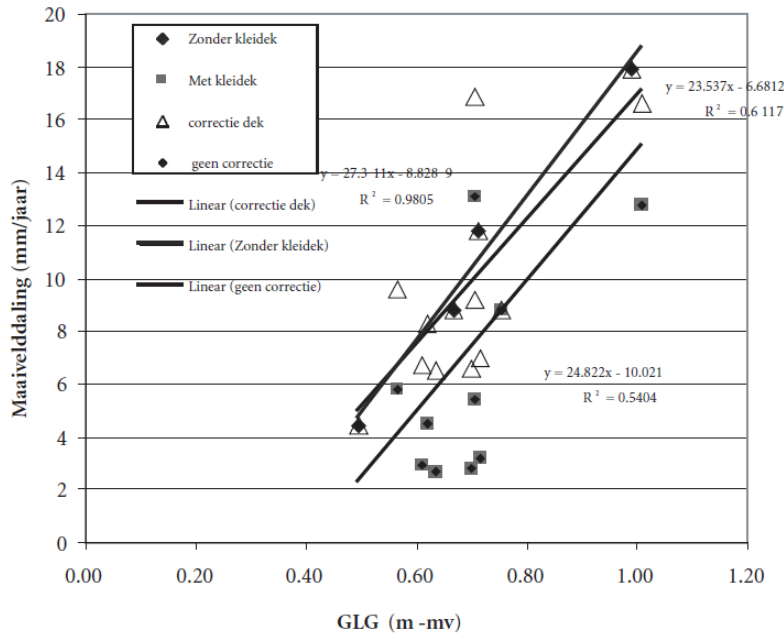
Onderstaande beschrijving betreft de situatie in 2020 rond de start van de RDGHB. Daarin worden eerst diverse rekenwijzen besproken die inzetbaar zijn of specifiek ontwikkeld zijn voor gebiedsdekkende bodemdalingsberekeningen. Aansluiten wordt kort ingegaan op een bodemfysisch model dat bedoeld is ter ondersteuning van onderzoek naar lokale, gedetailleerde bodemprocessen en hun interacties.

Rekenwijzen die (direct) inzetbaar of bedoeld zijn voor gebiedsdekkende bodemdalingsberekeningen door veenoxidatie.

Empirische relaties uit Zegveld

Tot ~2019 werd in gebiedsdekkende modellering van maaiveldddaling door oxidatie hoofdzakelijk gebruik gemaakt van empirische relaties tussen maaiveldddaling (mm/jr) en slootpeilen c.q. grondwaterstanden (m -mv) en een invloed van kleidekdikte (< 40 cm). Deze relaties zijn opgesteld/gebaseerd op langjarige metingen in de jaren '90 van de twintigste eeuw op het ROC/VIC in Zegveld en op enkele andere locaties (Kuikman e.a., 2005; Van den Akker e.a. 2007; Fig. 1). De maaiveldalingsmetingen zijn niet gecorrigeerd voor bijdragen van andere processen dan

oxidatie en bevatten daardoor bijdragen van compactie van dieper veen en van krimp van ondiep veen en/of kleidek door grondwaterstandsverlaging(en)¹.



Figuur 1. Metingen en rekenrelaties opgesteld door van den Akker e.a. 2007.

In het basisrapport (Van den Akker e.a., 2007) is kleidekdikte niet verwerkt als onafhankelijke variabele, maar is een aparte relatie opgesteld voor profielen met een kleidek waarin het slootpeil c.q. de grondwaterstand (GLG) de maaiveldalingsnelheid bepaalt.

Phoenix; samengestelde empirische relatie

Voor toepassing in Phoenix – dit instrument is gebruikt in bijvoorbeeld PBL studies - is door de ontwikkelaars van Phoenix (van der Schans en Houhuessen, 2011) een lineaire relatie voorgesteld waarin zowel GLG als kleidekdikte, K , expliciet als variabelen zijn opgenomen:

$v_{ox} = a \cdot GLG + b \cdot K + c$. Deze relatie is verder geheel gebaseerd op de relatie van Van den Akker, maar het voordeel hiervan is dat er niet hoeft te worden gewerkt met een binaire switch voor situaties met en zonder kleidek. Het toepassingsbereik is wel beperkt tot 'diep veen'; de formule is niet van toepassing als de basis van het veen minder diep dan 1,2 m -mv ligt. Volgens de documentatie zou in berekeningen rekening worden gehouden met het feit dat door de bodemdaling, bij vast grondwaterpeil, de oxidatiesnelheid afneemt omdat de GLG -mv afneemt; op welke wijze is niet duidelijk, het betreft primair een GIS-applicatie. Phoenix is onder andere gebruikt voor de eerste bodemdalingsvoorspellingskaart voor de Provincie Zuid-Holland.

Differentiaalvergelijking voor maaiveldhoogte

Hoogland e.a. (2012) hebben in een studie van de polder Groot-Mijdrecht maaiveldaling door oxidatie (en eventuele andere bijdragen) beschreven met een differentiaalvergelijking (in tijd) waarin de maaiveldalingsnelheid een lineaire functie is van de momentane drooglegging (die afneemt door oxidatie én een toegevoegde achtergrondaling voor andere oorzaken):

$$\frac{dE}{dt} = -K \times f \times (E - W) - C$$

¹ In het kader van NOVB zijn en worden recent meetsites ingericht in veenweidegebieden in meerdere provincies, waarmee een verrijkt beeld moet worden verkregen van de verschillende bodemdalingsprocessen, waaronder veenoxidatie. Deze meetsites zijn specifiek gericht op onderzoek naar de effectiviteit van maatregelen om bodemdaling door veenoxidatie te beperken, zoals door onderwaterdrainage en drukdrainage. Ook in project 44 van RDGHB worden enkele aanvullende meetsites ingericht in het Groene Hart.

E is hier maaiveldhoogte, W het oppervlaktewaterpeil, C de achtergrondaling, K de 'rate factor' van oxidatie, en f de fractie van de drooglegging $E-W$ waarin verondersteld wordt dat oxidatie plaatsvindt.

Een verschil met bovenstaande empirische relaties van Van den Akker e.a. (2007) en van der Schans en Houhuessen (2011), is dat de 'rate-factor' K (jr^{-1}) – deze is het equivalent van a in de relatie in Phoenix –, niet is gebaseerd op de empirische relatie(s) voor Zegveld, maar is bepaald door kalibratie van het model op lokale bodemdalingsschattingen voor de betreffende polder (verschilhoogte van TopHoogteMD en een Lidar dataset). Net als in de eerder beschreven empirische relaties, beschrijft het model feitelijk alleen het verlies van maaiveldhoogte zonder expliciete modellering van het verticale bodemprofiel.

De volgende rekenwijzen wijken af van de voorgaande conceptuele modellen door wel expliciet de hoogteverandering van lagen binnen bodemprofielen te modelleren.

Rate law voor de hoogteverlies van individuele bodemlagen/-voxels

Voor de update van de nationale klimaateffectatlas in 2017 zijn door Deltares en TNO nieuwe bodemdalingsprognoses opgesteld waarin veenoxidatieberekeningen zijn opgenomen (naast berekeningen voor compactie en een 'bijtelling' van daling door gaswinning). Berekeningen werden gedaan op een ondergrondmodel bestaande uit voxels (bodenvolumes) die elk een individuele lithoklasse en parameters kunnen worden toegekend, waardoor verticale bodemprofielen (op basis GeoTop en de bodemkaart) expliciet kunnen worden weergegeven. De oxidatiebijdrage werd toegepast op veenvoxels (of het deel van een voxel) boven de GLG. Voor deze voxels werd de volgende 'rate law' toegepast:

$$\frac{dh}{dt} = -V_{ox} h(t)$$

waarin h de voxelhoogte, en V_{ox} de 'rate constant'. De waarde $V_{ox} = 0,015$ m/m/jr werd gebruikt, wat weergeeft dat een voxel boven de GLG elk jaar ca. 1,5% van z'n hoogte verliest door oxidatie (ruwweg in overeenstemming met de empirische relaties uit Zegveld)². De voxelhoogte tendeert op de lange termijn (exponentieel met de tijd) naar nul mits de GLG niet wordt aangepast.

In een modelleerstudie van de historische bodemdaling van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland is bovenstaande 'rate law' ook gebruikt, maar is toegepast op een te specificeren fractie $(1 - \lambda_r)$ van de oorspronkelijke hoogte van veenvoxel h_0 in plaats van op de totale hoogte (Fokker e.a., 2017):

$$h_{ox} = (1 - \lambda_r)h_0$$

λ_r staat daarmee voor een niet oxideerbaar deel (residu).

Atlantis

Voortbouwend op bovenstaand 'rate law' principe, zijn door Deltares aanpassingen voorgesteld (Kooi e.a. 2020) die zijn gebruikt voor de vervaardiging van nieuwe bodemdalingsvoorspellingskaarten voor de Provincie Zuid-Holland met *Atlantis* (Bootsma e.a., 2020). Dit 'Deltares2020' model voor oxidatie gebruikt, net als de meeste bovenstaande rekenwijzen, GLG als sturende variabele. De belangrijkste aanpassingen ten opzichte van eerdere modellen zijn:

- De rate law heeft betrekking op de massa organische stof in een voxel in plaats van de voxelhoogte. De eenheid voor de rate constant is daardoor $\text{kg/m}^3/\text{jr}$ (verlies massa organische stof per volume-eenheid per jaar).
- Expliciete boekhouding van de hoeveelheid organische stof in het voxel en van het residu (minerale massa). Deze 'voorraad-voxel methodiek' staat toe dat ook bijdragen worden

² Deze rekenwijze werd waarschijnlijk al eerder toegepast in een bodemdalingsprognose voor de provincie Flevoland (De Lange e.a., 2012), maar is niet expliciet in de betreffende rapportage vermeld.

geleverd door organisch-rijke lagen anders dan veen en een deel van het materiaal niet verdwijnt. Dit is vergelijkbaar met de benadering van Fokker e.a. (2017), met het verschil dat informatie over het oxideerbare (organisch stofgehalte) en niet-oxideerbare (minerale) deel direct volgt uit datasets voor het organisch stofgehalte (massafractie van totale vaste stof massa) zoals in de bodemkaart. Een relatie voor droge bulkdichtheid als functie van het organisch stofgehalte relateert massa's aan bodemvolumes.

- Massaverlies organische stof per voxel wordt met een specifiek volumeverlies door oxidatie \hat{v} (m^3/kg) omgezet naar volumeverlies om bodemdaling te kwantificeren.
- Veenoxidatie wordt niet toegepast tot aan de GLG, maar tot een specificeerbare hoogte H_v^0 ($\sim 0,3$ m) daarboven. Dit sluit beter aan bij de empirische 'Zegveld relaties' die vooralsnog zijn gebruikt om de diverse parameterwaarden op af te stemmen. Uit studie naar de diepte van veraard veen ten opzichte van de GLG in Flevoland is recent naar voren gekomen dat $H_v^0=0,3$ m ook goed aansluit bij de situatie in die provincie (Kooi, et al., 2023).

Met deze aanpassingen wordt, in ieder geval in conceptuele zin, de aandacht verlegd naar de onderliggende oorzaak van de bodemdaling, namelijk de afbraak van organisch materiaal. Ook moet hierdoor expliciet aandacht worden geschonken aan de relatie tussen afbraak van organisch materiaal en volumeverlies in de bodem. Wat onveranderd is gebleven is dat de parameterwaarden voor de modellering zo zijn 'ingeregeld' dat de bodemdaling die wordt berekend in overeenstemming is met 'de empirische Zegveld data'.

Bodemfysische modellen

Bodemfysische modellen hanteren niet alleen behoudswetten (zoals in Atlantis voor vaste stoffdelen), maar simuleren ook transport van stoffen (bijvoorbeeld water, zuurstof en andere stoffen die een rol kunnen spelen bij de afbraakprocessen) en energie/warmte. De modellen zijn in vergelijking met de boven besproken rekenwijzen zeer rekenintensief en daardoor veel minder of niet geschikt voor gebiedsdekkende modellering over langere tijdspannen. Ook vragen deze modellen een veel uitgebreidere parametrisatie, waarbij soms uitgangspaarparameterwaarden niet ruimtelijk vast te stellen zijn. Bodemfysische modellen zijn daarom vooral nuttig om de rol van onderliggende fysische processen en hun interacties te bestuderen en begripsvorming. Dat betekent niet dat deze modellen geen betekenis hebben voor gebiedsdekkende modellering. De inzichten die kunnen worden opgedaan met bodemfysische modellen kunnen worden gebruikt om simpelere relaties op te stellen op een 'hoger aggregatieniveau' die kunnen worden gebruikt in de minder complexe, geparametriseerde modellen zoals in Atlantis.

SWAP-Animo

Met de modelkoppeling SWAP-ANIMO (Kroes et al. 2017; Groenendijk et al. 2005) kunnen expliciete berekeningen aan water, stof (nitraat, sulfaat), zuurstof en warmtetransport worden uitgevoerd aan een pseudo-2D kolom, waarbij ook de invloed van gewasgroei wordt meegenomen. Aan de hand van een schematisatie van de koolstofopbouw en afbraakgevoeligheden als functie van diepte in de bodem kan een inschatting gemaakt worden van de afbraak van organische stof en de daarmee samenhangende koolstofuitstoot. Deze afbraak wordt op eenvoudige wijze gerelateerd aan het volumeverlies als functie van diepte door vermenigvuldiging met een (diepte onafhankelijke) vertalingsfactor (Hendriks et al. 2007).

3. Wat zijn de zwakke(re) punten?

3.1 Evaluatie door WEnR en TNO van het Deltares2020 model.

Februari 2021 is in een bijeenkomst met Deltares en WENR experts het Deltares2020 model nader tegen het licht gehouden. O.a. in het kader van de te maken update van de nationale

bodemdalingsvoorspellingskaarten voor de klimaateffectatlas. De volgende aspecten die betrekking hebben op oxidatie werden daarbij benoemd.

1. Het gebruik van H_v^0 als zone boven de GLG waarin oxidatie verwaarloosbaar wordt geacht vraagt om meer onderbouwing. De data van Figuur 1 geven weliswaar dat de bodemdalingssnelheid sterk afneemt wanneer de GLG een zeer kleine waarden van 0,3 a 0,4 m bereikt. De metingen tonen echter niet aan dat bij diepere GLG waarden, bijvoorbeeld van 1,0 m, er geen bijdrage van oxidatie meer is van de corresponderende diepere delen boven de GLG.
2. Buiten harde dieptegrenzen voor aerobe oxidatie, of dit nu de GLG betreft, of een bepaald niveau daarboven aangegeven met H_v^0 , veronderstelt het Deltares2020 model dat diepte verder geen rol speelt. Dat wil zeggen een 20 cm dikke veenlaag aan maaiveld, of eenzelfde 20 cm dikke veenlaag aanzienlijk dieper in het profiel, maar binnen het bereik van oxidatie, breken af met dezelfde snelheid. Dit zal in werkelijkheid anders liggen, waarbij diverse invloeden en factoren meespelen, bijvoorbeeld het bodemvochtgehalte en de bodemtemperatuur.

Beide aspecten hebben betrekking op de diepteafhankelijkheid van de aerobe afbraak.

3.2. Wat zijn verder nog zwakke punten?

3. De tijdsresolutie van modellering is erg gering. Dat is het gevolg van de beschikbare empirische relaties die de basis of kapstok vormen voor de modellering. De GLG is per definitie een langjarige maat (~8 jaar) voor de grondwatersituatie, en bodemdalingssnelheden die daaraan is gekoppeld is alleen langjarig met enige betrouwbaarheid gemeten.
4. Er is geen duidelijke koppeling met kennis/inzichten over het afbraakproces van organisch materiaal; kennis die in principe wel wordt ondergebracht in bodemfysische modellen. Die kennis betreft de rol van meer (en hogere tijdsresolutie) stuurvariabelen dan de GLG zoals bodemtemperatuur, bodemvocht, zuurstofbeschikbaarheid, microbiologische gemeenschappen e.d.
5. Over de processen en factoren die het volumeverlies bepalen bij afbraak en massaverlies van organisch materiaal, is vrijwel niets bekend. Daar wordt nu feitelijk 'een conceptuele slag naar geslagen'. Bodemdaling door oxidatie staat vrijwel zeker niet los van mechanica. Wanneer vezels draagkracht geven aan de structuur lijkt het redelijk om te veronderstellen dat oxidatie de draagkracht, sterkte en stijfheid, verzwakt en dat daardoor op mechanische wijze volumeverlies/verdichting optreedt. Tegelijkertijd verdwijnt ook materiaal wat bij zal dragen aan verlies van het bulk volume. Hier is behoefte aan een geschikt conceptueel model, waarbij aandacht moet worden besteed aan de meetbaarheid.
6. Indien veenoxidatie primair resulteert in sterkteverlies van het veenskelet, treedt bodemdaling mogelijk met vertraging op ten opzichte van de veenoxidatie die daaraan ten grondslag ligt³. Perioden met diepe grondwaterstanden zijn bepalend voor mechanische samendrukking en daarmee voor bodemdaling. Maar veenafbraak vindt ook plaats gedurende perioden met gemiddelde grondwaterstanden, mogelijk wel langzamer, maar dit kunnen lange aaneengesloten perioden beslaan. Het is daarom denkbaar dat andere grondwaterkarakteristieken dan de (jaarlijks) diepste grondwaterstand (of de GLG) een betere correlatie zouden geven met de veenafbraak.
7. De empirische basis is nog zwak. Buiten de datasets van het VIC Zegveld en vergelijkbare locaties is er vrijwel geen data die bruikbaar is om modelleringsresultaten te toetsen/valideren en parametrisatie te sturen. Beperkingen betreffen o.a.

³ Dit geldt dan ook voor bodemdaling en CO₂ emissie.

- Veentypen. Bovenstaande locaties dekken hoofdzakelijk bosveen/broekveen (eutroof); er is daarom geen informatie om te kunnen vaststellen of andere veentypen, met name mesostroof en oligotroof veen met dezelfde parameterwaarden kunnen worden gemodelleerd.
- Locaties met een andere samenstelling mineraal dek, of mineraal dek met een grotere dikte (o.a. Flevoland).

Ook binnen de beschikbare empirische datasets voor 'Zegveld' is de spreiding groot; dat wil zeggen de nauwkeurigheid van een individuele/lokale voorspelling op basis van een lineaire correlatie is laag.

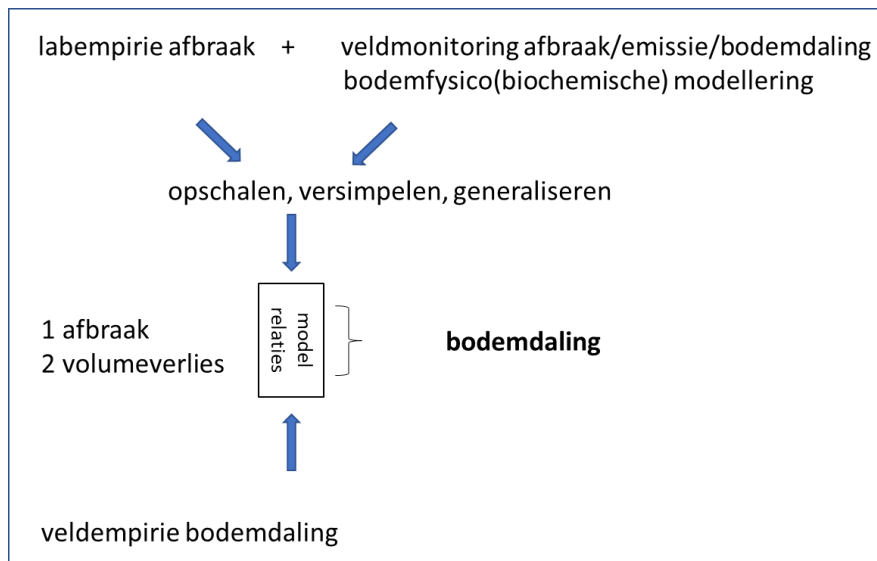
4. Algemene discussie mogelijke richtingen van verbeteringen.

De kennisbasis voor de huidige bodemdalingsmodellering (tot en met Atlantis) bestaat hoofdzakelijk uit de langjarige bodemdalingsmonitoringsdata van 'Zegveld' en de empirische relaties die daaruit zijn afgeleid. Deze basis lijkt op dit moment maximaal benut. Om de diverse genoemde zwakke punten van de vorige sectie te adresseren en modellering te verbeteren is het daarom noodzakelijk om te zoeken naar aanvullende kennis en data. Daarbij kan worden gedacht aan de volgende drie benaderingen.

- Uitbreiden van langjarige monitoring zoals in Zegveld op aanvullende locaties (punt 7).
- Onderzoek doen naar correlaties in bredere datasets die mogelijk aanvullend inzicht verschaffen over concepten/parametrisatie die wordt gebruikt in Atlantis. Bijvoorbeeld studie naar de veraardingsdiepte van veen in relatie tot GLG en mineraal dek (punten 1, 6 en 7).
- Het benutten en ontwikkelen van meer fundamentele kennis⁴ over de factoren die de afbraaksnelheid van het organisch materiaal en het volumeverlies van het bodemmateriaal bepalen om modelrelaties verder te ontwikkelen. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2. Dit lijkt de enige manier om beter grip te krijgen op aspecten als:
 - diepteafhankelijkheid van afbraak (punten 1 en 2),
 - incorporeren van proceskennis en mogelijk aanvullende of andere 'stuurvariabelen' (temperatuur, jaar- of seizoenskarakteristieken van het grondwatersysteem) (punt 4)
 - te komen tot modellen met een hogere tijdsresolutie (punt 3).

Voor het benutten van fundamentele kennis over factoren die de afbraaksnelheid van het organisch materiaal bepalen, biedt recent onderzoek uitgevoerd in het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden aanknopingspunten. Dit onderzoeksprogramma richt zich op het bepalen van de effecten van maatregelen voor het beperken van broeikasgasuitstoot centraal. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van het opgebouwde mechanistisch begrip rondom veenoxidatie en de bijbehorende broeikasgasuitstoot. Mogelijk biedt dit mechanistisch begrip ook aanknopingspunten om de bodemdaling als gevolg van veenoxidatie procesmatig uit te werken. In het modelinstrumentarium dat een onderdeel vormt van SOMERS (Subsurface Organic Matter Emission Registration System) wordt op dagbasis per perceel in een dwarsdoorsnede de grondwaterstand berekend. Op basis hiervan worden bodemvocht- en bodemtemperatuurprofielen doorgerekend. Samen met de zuurstofindringing wordt vervolgens een inschatting gemaakt van de afbraakomstandigheden voor organische stof en dit wordt omgezet in een daadwerkelijke koolstofdioxide-emissie. Hiermee is de afbraaksnelheid van veen (de veenoxidatie) met hoge resolutie in tijd en ruimte bekend. Een volgende belangrijke stap voor het voorspellen van bodemdaling op een procesmatige manier is dat deze berekende veenoxidatie omgezet kan worden in een volumeverlies.

⁴ Soms wordt het begrip 'proceskennis' gebruikt omdat in de benadering meer gezocht wordt naar verklaring van het fenomeen (afbraak of bodemdaling) vanuit onderliggende relaties. Uiteindelijk berust de kennis over die onderliggende relaties ook in sterke mate op empirie, maar dan op een kleiner schaalniveau.



Figuur 2. Generieke benadering om te komen tot verbeteringen in de modellering. In de huidige of oude situatie zijn de benodigde modelrelaties voor gebiedsdekkende modellering vrijwel geheel afhankelijk van 'veldempirie' over langjarige bodemdaling (onderste deel van het schema). De modelrelaties dienen verder te worden ontwikkeld middels fijnschaligere labstudies naar afbraak van organisch materiaal, fijnschaligere modellering, koppeling met koolstofemissie (bovenste deel van het schema).

Volumeverlies door afbraak van organisch materiaal onderzoeken is bijzonder lastig. Veldcondities, zoals waterspannings- en zuigspanningsswisselingen spelen waarschijnlijk een belangrijke rol. Dit is moeilijk na te bootsen in het lab en de rol ervan is niet goed te meten in het veld.

De toetsing van de uitkomsten in het veld met langjarige monitoring blijft essentieel en moet worden uitgebreid. Hierbij moet specifieke aandacht zijn voor het ontrafelen van processen die leiden tot bodemdaling, zoals het scheiden van bodemdaling als gevolg van compactie van de bodemdaling als gevolg van veenoxidatie of krimp.

Enkele specifieke punten die nadere aandacht/studie verdienen zijn:

- **Invloed organisch stofgehalte** op C-uitstoot en M_{org} -verlies door oxidatie. Rojstaczer en Deverel (1995) en Deverel en Leighton (2010) geven aan dat organisch stofgehalte in sterke mate de emissie en de bodemdaling door oxidatie bepaalt. Dit is voor de broeikasgasuitstoot ook gevonden in Nederland in studies binnen het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweiden (o.a. Aben et al., in prep.). In het model SUBCALC van Deverel en Leighton (2010) wordt (voor emissie) een formulering gebruikt op basis van de Michaelis-Menton kinetiek:

$$C_{\text{flux}} = \frac{C_{\text{flux}_{\text{max}}} \cdot F_{\text{oc}}}{K_m + F_{\text{oc}}} \quad (\text{kg C/m}^2/\text{yr}); \text{ N.B. } C_{\text{flux}_{\text{max}}} \text{ virtueel voor } F_{\text{oc}} = \infty$$

F_{oc} staat hier voor organisch koolstofgehalte, en K_m het gehalte waarbij de maximale flux is gehalveerd.

Merk op dat de maximale koolstofemissieflux hier is geïnitieerd voor een bepaald dieptebereik (nominaal tot grondwaterstand) en organisch stofgehalte een gemiddelde is voor dit diepte interval.

In Atlantis (Deltares2020 model) is aangenomen dat de afbraak van organisch stofgehalte in $\text{kg}_{\text{org}}/\text{m}^3/\text{jr}$ onafhankelijk is van het organisch stofgehalte, voor de grondsoort veen.

In het SOMERS modelinstrumentarium (Erkens et al., 2022) wordt het gehalte organische stof meegenomen bij afbraak, maar is dit alleen limiterend bij zeer lage gehalten (<15% organisch stof gewichtspercentage).

- **Rol afbreekbaarheid organisch materiaal.** Arets e.a. (2019; p. 65) noemen tijdsafhankelijkheid: "During the process of oxidation of the peat the decomposability of the remaining peat decreases, resulting in a decreasing rate of surface lowering". Aan de andere kant wordt er met name boven in de bodem, de bovenste 50 cm in het geval van grasland, steeds weer nieuw organisch materiaal toegevoegd, wat ook tot een 'priming effect' kan leiden. In dat geval werkt het verse organisch materiaal als voeding voor bacteriële populaties die daarmee ook voor grotere afbraak van inerte ouder materiaal kunnen zorgen. Diverse publicaties noemen ook type veen/organisch materiaal (bijvoorbeeld Stephens, 1984) als belangrijke factor voor de mate van veenoxidatie en de afbreekbaarheid. Daarnaast zijn omgevingsomstandigheden belangrijk voor de snelheid van afbreken, zoals bodemvocht en -temperatuur, pH, nutriëntenbeschikbaarheid, effectieve porositeit en dichtheid.

5. Vervolgstappen voor het introduceren van proceskennis in oxidatiemodellen

Om tot verbeterde modellen voor bodemdaling door veenoxidatie te komen worden ten slotte de volgende stappen voorgesteld.

- Het opstellen en toepassen van conceptuele modellen voor volumeverlies door veenoxidatie. In het huidige instrumentarium wordt feitelijk steeds een laagje veen met een bepaalde dichtheid verwijderd uit het profiel, wat zich vertaalt in volumeverlies en bodemdaling. In werkelijkheid vindt er afbraak plaats verdeeld over het skelet van het organisch materiaal in de bodem onder invloed van in de tijd veranderende omstandigheden, én is het de vraag of de afbraak direct leidt tot volumeverlies. Het eerste conceptuele model dat moet worden uitgewerkt en toegepast hanteert het uitgangspunt dat het volumeverlies indirect ontstaat, waarin de veenoxidatie primair zorgt voor verzwakking van het dragende skelet van veen, en mechanische belasting vervolgens zorgt voor het volumeverlies. De mechanische belasting hangt vooral samen met zuigspanningen die bij herhaling ontstaan in de onverzadigde zone tijdens droge perioden. De bodemdaling heeft daarmee het karakter van een afbraak-gedreven krimpproces. In deze benadering zijn bodemdaling en veenoxidatie op kortere tijdschalen (maanden, jaren) niet meer 1-op-1 aan elkaar gekoppeld (Erkens & Van Asselen, 2023). Alleen over langere termijnen (decennia) is de koppeling nog wel te maken. Het model levert verwachtingen over de tijdsontwikkeling van bodemdaling door veenoxidatie die vervolgens getoetst moeten worden (zie stap hieronder). Ter vergelijking met dit conceptuele model, is het nuttig om ook een tweede conceptueel model te kunnen gebruiken waarin een directe relatie tussen afbraak en volumeverlies wordt aangehouden. Een eerste versie daarvoor is recent ontwikkeld door Poortstra (2023) waarin het model is gekoppeld met uitkomsten van SOMERS voor de ontwikkeling van de afbraak in het bodemprofiel.
- Het doen van gerichte veld- en labstudies naar volumeverlies in veenbodems door veenafbraak. Extensometer data moeten worden benut om te onderzoeken of onomkeerbare bodemdaling vooral plaatsvindt in perioden dat de mechanische belasting van het veen groot is, maar de afbraaksnelheid beperkt of gering. Labonderzoek zou zich moeten richten op sterkteverlies van het dragende skelet van organisch materiaal door afbraak. Op deze wijze moet worden gezocht naar aanwijzingen vóór of tegen de bovengenoemde verschillende modelbenaderingen en naar basisinformatie om deze modellen te parametriseren.

6. Referenties en literatuur

Arets, E.J.M.M., J.W.H. van der Kolk, G.M. Hengeveld, J.P. Lesschen, H. Kramer, P.J. Kuikman, M.J. Schelhaas (2019). Greenhouse gas reporting of the LULUCF sector in the Netherlands, WO-technical report 146.

Bootsma, H., H. Kooi, G. Erkens (2020). Atlantis, a tool for producing national predictive land subsidence maps of the Netherlands. *Proc. IAHS*, 382, 415–420, <https://doi.org/10.5194/piahs-382-415-2020>

Van den Akker, J.J.H., J. Beuving, R.F.A. Hendriks en R.J. Wolleswinkel (2007). Maaiveld daling, afbraak en CO₂-emissie van Nederlandse veenweidegebieden. *Leidraad Bodembescherming*, Afl. 83.

Deverel S.J., T. Ingram, D. Leighton (2016). Present-day oxidative subsidence of organic soils and mitigation in the Sacramento-San Joaquin Delta, California, USA. *Hydrogeol. J.* 24:569-586. DOI 10.1007/s10040-016-1391-1

Deverel S.J., D.A. Leighton (2010). Historic, recent, and future subsidence, Sacramento-San Joaquin Delta, California, USA. *San Franc Estuary Watershed Sci* 8(2). doi:[10.15447/sfews.2010v8iss2art1](https://doi.org/10.15447/sfews.2010v8iss2art1)

Erkens, G., S.A. van Asselen (2023). The relation between land subsidence and CO₂ emission in peatlands. *TISOLS 2023 abstract*. <https://www.tisols.org/conference>

Fokker, P.A., J.L. Gunnink, K. Koster, G. de Lange (2019). Disentangling and parameterizing shallow sources of subsidence: application to a reclaimed coastal area, Flevoland, the Netherlands. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, doi: 10.1029/2018JF004975

Groenendijk, P., Renaud, L. V., & Roelsma, J. (2005). Prediction of nitrogen and phosphorus leaching to groundwater and surface waters; Process descriptions of the ANIMO4.0 model. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 983. <https://edepot.wur.nl/35121>.

Hendriks, R.F.A., Wolleswinkel, R., & van den Akker, J.J.H. (2007). Predicting soil subsidence and greenhouse gas emission in peat soils depending on water management with the SWAP-ANIMO model. In: *Proceedings of the First International Symposium on Carbon in Peatlands, Wageningen, The Netherlands*. <https://edepot.wur.nl/159749>.

Kooi, H., G. Erkens, H. Bootsma, E. van Onselen, R. Melman (2020). Toelichting bij de nieuwe bodemdalingsvoorspellingskaarten. *Deltares Memo aan de PZH*.

Kooi, H., G. Bakema, J. Gunnink, R. Melman, D. Walvoort, B. Knaake, S. Jansen, G. Erkens (2023). Bodemdalingsprognose Flevoland, versie 2023. *Deltares rapport 11208645*. [Bodemdalingsprognose Flevoland versie 2023 | Deltares](https://www.deltares.nl/publicaties/bodemdalingsprognose-flevoland-versie-2023)

Kroes, J. G., van Dam, J. C., Bartholomeus, R. P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R. F. A., Mulder, H. M., Supit, I., & van Walsum, P. E. V. (2017). SWAP version 4; Theory description and user manual. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 2780. <https://doi.org/10.18174/416321>.

Kuikman, P.J., J.J.H. van den Akker, F. de Vries (2005). Emissie van N₂O en CO₂ uit organische landbouwbodems. *Alterra, Wageningen, Alterra rapport 1035 – 2*.

Poortstra, J. (2023), Towards process-based modeling of land subsidence due to peat oxidation in the Netherlands. *MSc-thesis Utrecht University*, 37 pp.

Rojstaczer S.A., S.J. Deverel (1995). Land subsidence in drained histosols and highly organic mineral soils of California. *Soil Science Society of America Journal* 59:1162–1167.

Stephens J.C., L.H. Allen, E. Chen (1984). Organic soil subsidence. In: Holzer TL (ed) Man-induced land subsidence. Reviews in Engineering Geology, vol VI. Geological Society of America, Boulder, CO, VS.

Van der Schans, M.L., Y. Houhuessen (2011). Phoenix 1.0, deelrapport 1. Onderbouwing rekenregels regionale bodemdalingsapplicatie. Deelrapport 1: Onderbouwing rekenregels regionale bodemdalingsapplicatie, Grontmij Netherlands B.V., De Bilt, the Netherlands, 2011.