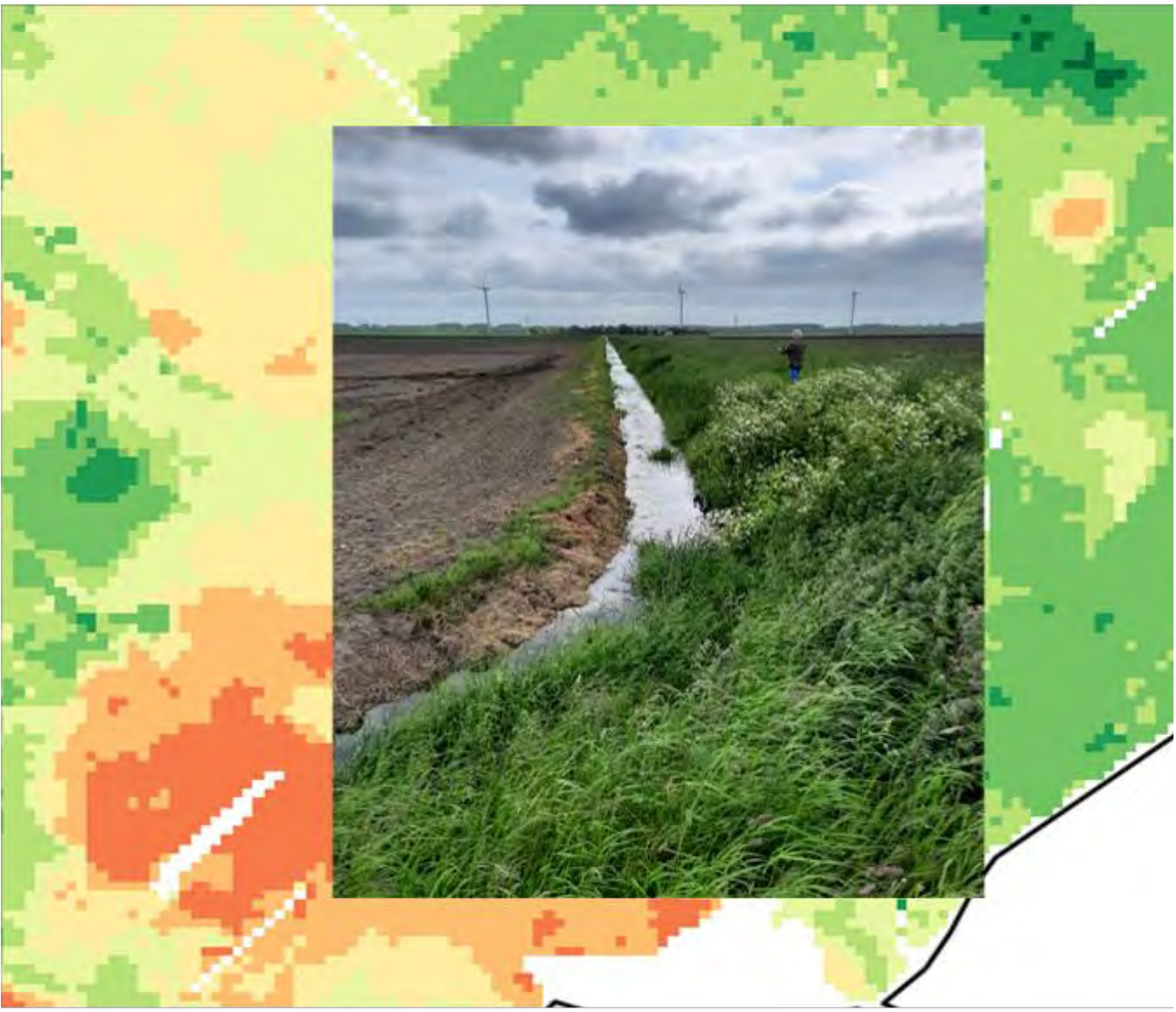
Deltares

Bodemdalingsprognose Flevoland

versie 2023



Bodemdalingsprognose Flevoland
versie 2023

Auteur(s)
Henk Kooi
Guido Bakema
Jan Gunnink
Roel Melman
Dennis Walvoort
Bas Knaake
Siem Jansen
Gilles Erkens

Bodemdalingsprognose Flevoland
versie 2023

Opdrachtgever	Waterschap Zuiderzeeland Provincie Flevoland
Contactpersoon	de heer M. Heuser de heer C. Klepper

Documentgegevens	
Versie	0.1
Datum	22-11-2023
Projectnummer	11208645-002
Document ID	11208645-002-BGS-0003
Pagina's	114
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		
	Henk Kooi	
	Guido Bakema	
	Jan Gunnink	
	En anderen	

Samenvatting

Aanleiding en opdracht
Provincie Flevoland (PFL) en waterschap Zuiderzeeland (ZZL) hebben een gezamenlijke verantwoordelijkheid voor het creëren, onderhouden en aanpassen van randvoorwaarden waarbinnen de functies wonen, werken, landbouw en natuur zo optimaal mogelijk kunnen bestaan. Een goed functionerende waterhuishouding en een goede bodemgesteldheid zijn essentiële onderdelen van die randvoorwaarden. Eén van de factoren die bodemgesteldheid en de waterhuishouding in de loop van de tijd veranderen, en waar beide overheden rekening mee moeten en willen houden, is de bodemdaling in het beheergebied. Bodemdaling is relevant voor actuele beleidsopgaven van de provincie zoals de stedelijke gebiedsontwikkeling en klimaatadaptatie. Een prognose van bodemdaling is onder andere nodig voor de toetsing aan de normen voor regionale wateroverlast waarvan de eerstvolgende in 2024 zal plaatsvinden.
De meest recente gebiedsdekkende bodemdalingsprognose dateert van ruim tien jaar geleden (De Lange e.a., 2012). Omdat wetenschappelijke inzichten en datasets rond bodemdaling zich snel ontwikkelen, hebben ZZL en PFL een consortium van Deltares, WENR en TNO een voorstudie voor de nieuwe prognose laten uitvoeren (Kooi e.a., 2022), en aansluitend opdracht verleend om de nieuwe prognose op te stellen. Dit rapport doet verslag van de werkzaamheden voor en resultaten van de nieuwe prognose. De vorige en de nieuwe prognose worden verder respectievelijk aangeduid met *prognose 2012* en *prognose 2023*.

Werkwijze
Waar *prognose 2012* was gemaakt vanuit een *retrospectieve benadering,* waarin de berekeningen werden geleid door de historische ontwikkeling vanaf de drooglegging van de verschillende polders, is voor *prognose 2023* om verschillende redenen overgestapt op een *actuele benadering* waarin berekeningen starten bij de huidige, of recente, bodemopbouw en grondwatersituatie. Daarin is/zijn:

- Een nieuw ondergrondmodel van Flevoland gebouwd dat de actuele bodemopbouw in termen van zand, leem, klei, en veen beschrijft. Voor de bovenste 1,6 m van dit model is gebruik gemaakt van de meest actuele informatie van de bodemkaart. Voor diepere delen is gebruik gemaakt van een recent model van TNO.
- Het meest actuele grondwaterdieptemodel (WDM) gebruikt.
- Rekenwijzen geactualiseerd en modelparameters aangepast voor de Flevolandse situatie. Hiervoor zijn verschillende deelstudies en ondersteunende karteringen uitgevoerd, zoals van typen veen in Flevoland en de rijpingsgraad van de ondiepe zand/klei/leem ondergrond.

Er is voor *prognose 2023* gebruik gemaakt van een breed scala aan bronnen en inzichten, en een state-of-the-art productiewijze die in samenspraak met deskundigen van ZZL en PFL zijn ingezet.

Het scenario
Prognose 2023 betreft een toekomstscenario waarin:

- Waterpeilen in Flevoland onveranderd blijven.
- Zich een gematigde klimaatontwikkeling voordoet volgens het KNMI'14 GL scenario.
- Landgebruik en ondiepe grondwaterwinning ongewijzigd blijven.

De nieuwe klimaatscenario's 2023 van het KNMI konden nog niet worden gebruikt voor deze prognose, maar kunnen relatief makkelijk worden opgenomen in een update. Ook extra scenario's kunnen vrij gemakkelijk worden toegevoegd.

Opname in Atlantis
De productie van *prognose 2023* voor Flevoland is vastgelegd en uitgevoerd in *Atlantis*, de open source productieomgeving waarmee Deltares, TNO en WENR ook de nationale bodemdalingsvoorspellingenkaarten maken die o.a. worden gepubliceerd in de nationale klimaateffectatlas. Zowel *prognose 2023* voor Flevoland als toekomstige updates daarvan worden daardoor 'automatisch' verwerkt in updates van de nationale klimaateffectatlas. Door opname in Atlantis is reproduceerbaarheid van de prognose gegarandeerd (dit was niet het geval voor de vorige prognose), kunnen verbeteringen in de datasets voor bodem en grondwater in Flevoland relatief eenvoudig worden verwerkt tot een nieuwe prognose, en kunnen ook generieke verbeteringen in de doorontwikkeling van Atlantis worden benut.

De prognose
Prognose 2023 bestaat uit een basiskaart en twee kaarten die lagere en hogere bodemdalingsverwachtingen tonen. De basiskaart betreft 'de beste' schatting. De kaarten 'prognose laag' en 'prognose hoog' geven een beeld van de onzekerheid (bandbreedte) van de prognose.
Prognose 2012 voorspelde een forse bodemdaling in grote delen van Zuidelijk Flevoland, het sterkst direct ten noorden en ten oosten van Almere Buiten met daling voor de periode 2011-2100 van meer dan een meter[1]. Volgens *prognose 2023* is de bodemdaling in dit gebied zeer onzeker maar ook geringer (voor het gebruikte scenario). De basisprognose toont daling tot enkele decimeters voor de periode 2020-2100. 'Prognose hoog' laat zien dat daling van meer dan een halve meter op diverse plaatsen niet kan worden uitgesloten, met name door (rest)rijping van het minerale dek en oxidatie van onderliggend veen. Daling in de orde van meer dan een halve meter wordt echter niet verwacht. 'Prognose laag' laat zien dat de daling in Zuidelijk Flevoland voor het gekozen scenario ook beperkt zou kunnen blijven tot maximaal een decimeter.
In Oostelijk Flevoland wordt in *prognose 2023* alleen significante bodemdaling (ca. een halve meter) in 2100 berekend in een zone ten noord(oosten) van Dronten. De grote daling ten noorden van Lelystad die *prognose 2012* toonde, is in de nieuwe prognose niet aanwezig. Voor de Noordoostpolder toont de basisprognose diverse gebieden waar daling tussen 40 en 75 cm wordt bereikt in 2100, vooral door veenoxidatie (nabij Schokland, ten zuiden van Tollebeek, ten noorden van Urk, ten noordwesten van Emmeloord, op de overgang naar het oude land rond Kuinre en tussen Emmeloord en Marknesse).

De bebouwde omgeving is niet opgenomen in de prognose, met uitzondering van Oosterwold. De reden om bebouwd gebied niet op te nemen is dat maaiveldhoogteverandering in stedelijk gebied gecompliceerd is door renovaties/ophogingen, de daling sterk wordt bepaald door de wijze waarop wijken bouwrijp zijn gemaakt en/of gerenoveerd. Ook kan de bodemdaling in de bebouwde omgeving over het algemeen sterk verschillen voor wegdelen, bermen/parken, sportvelden e.d. Prognose in de stedelijke omgeving vraagt om een andere benadering dan de landelijke omgeving.

Omdat een prognose altijd onzekerheid met zich draagt – de mate van onzekerheid is in beeld gebracht met 'prognose laag' en 'prognose hoog' – zijn verdere afwegingen en keuzes nodig voor gebruik van de prognose in specifieke toepassingen. Bijvoorbeeld of kan worden volstaan met gebruik van de basisprognose, de hoge prognose, een onderbouwde aanpassing daarvan, of dat meerdere varianten moeten worden gebruikt. Deze afwegingen en keuzes zijn toepassingsafhankelijk en moeten door de gebruiker worden gemaakt. Inzet van deskundigen van ZZL en/of PZL en, waar nodig van externe experts, is daarbij wenselijk.

Aanbevelingen

[1] Bij de vorige prognose zijn factoren die bijdragen aan onzekerheid daarvan wel besproken in de rapportage, maar is geen poging gedaan om deze te schatten en ruimtelijk in beeld te brengen.

Om de bodemdalingsprognose voor Flevoland verder te kunnen verbeteren, en de onzekerheid daarin te verkleinen, is het vooral noodzakelijk om feitelijke informatie over de ‘actuele’ bodemdaling in Flevoland en de bijdragen daarin van (rest)rijping, oxidatie en compactie te vergaren. Sinds het beëindigen van het onderzoek op de voormalige rijpingsterreinen begin jaren ’90 van de vorige eeuw, is het zicht op bodemdaling en bodemdalingsprocessen in de provincie min of meer weggevallen. Daarom wordt sterk aanbevolen om op meerdere plaatsen in de provincie bodemdalingsmeetsites te realiseren, zoals dat ook gebeurt in andere delen van Nederland waar bodemdaling belangrijk is voor de duurzame inrichting, zoals in het Groene Hart. Daarnaast wordt aanbevolen om meer duidelijkheid te verkrijgen over een aantal specifieke aspecten van rijping en oxidatie zoals het achterblijven van rijping voor specifieke kleitypen en de afbraakgevoeligheid van de verschillende veentypen, en wordt aanbevolen de basisgegevens over bodemopbouw en grondwater in de provincie te blijven uitbreiden, met name in de bodemdalingsgevoelige gebieden van *prognose 2023*.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
1	**Introductie**	**10**
1.1	Aanleiding en opdracht	10
1.2	Leeswijzer	10
I Algemeen deel		**11**
2	**Uitgangspunten**	**12**
3	**Aanpak**	**15**
3.1	Fase 1 Voorbereidende werkzaamheden	16
3.2	Fase 2 Berekeningen, kaartproductie en rapportage	18
3.3	Belangrijkste verschillen ten opzichte van prognose 2012	18
4	**De prognosekaart(en)**	**20**
4.1	Overzichtstabel	20
4.2	Impressie en kengetallen van de bodemdalingsprognose	20
4.3	Verschillen in dalingsbeeld ten opzichte van prognose 2012	24
4.4	Relevante aspecten voor kaartgebruik	26
5	**Mogelijkheden voor aanvulling en verbetering**	**28**
II: Technische toelichting		**30**
6	**Kaartproductieomgeving Atlantis**	**31**
7	**AHN analyse**	**33**
7.1	Aangevulde tijdreeksen maaivelddaling rijpingsterreinen	33
7.1.1	Methode	33
7.1.2	Resultaten	33
7.2	Maaivelddalingssnelheidskaart op basis van AHN2,3,4	34
7.2.1	Methode	34
7.2.2	Resultaat	36
7.2.3	Duiding	37
8	**Ondergrondmodel**	**39**
8.1	Inleiding	39
8.2	Productiewijze ‘diepe deel’	39
8.3	Productiewijze bodemdeel	40
8.4	NAP hoogte	44

9 Kartering rijpingsgraad 45
9.1 Werkwijze 45
9.2 Resultaten 46

10 Kartering veentypen 51
10.1 Werkwijze 51
10.2 Resultaten 52

11 Rekenwijze rijping 56
11.1 Inleiding 56
11.2 Uitgangspunten 56
11.3 Rekenwijze 57

12 Rekenwijze oxidatie 59
12.1 Rekenwijze 59
12.2 Onderzoek naar gebiedsspecifieke parametrisatie 60
12.2.1 De invloed van veentypen 60
12.2.2 Invloed minerale dek 62
12.2.3 Hoogte boven de GLG zonder oxidatie 63
12.2.4 Organische stofdichtheid veen 67
12.3 Verwerking van de temperatuurontwikkeling in het klimaatscenario 68

13 Rekenwijze compactie 71

14 GLG 72
14.1 Startconditie 72
14.2 Ontwikkeling van GLG in de tijd 73
14.2.1 Aanpak verwerking klimaatscenario 73
14.2.2 Aanpak verwerking maaivelddaling 74

15 Startparametrisatie 75
15.1 Parameterwaarden op basis van ruimtelijke kartering 75
15.2 Parameterwaarden gekoppeld aan lithoklassen en ruimtelijk uniforme parameterwaarden 76
15.3 Tijdsdiscretisatie 77

16 Gevoeligheidsanalyse 78
16.1 Geselecteerde locaties 78
16.2 Variatie parameterwaarden in gevoeligheidsanalyse 79
16.3 Resultaten 79
16.3.1 Statistieken 80
16.3.2 Bespreking 81

17 Definitieve parametrisatie basiskaart en bandbreedtekaarten 82
17.1 Overwegingen voor de basiskaart 82

17.2 Overwegingen voor de bandbreedtekaarten 83
17.3 Parametrisatie 83

18 Referenties 85

19 Bijlagen 88

A Digitale bijlagen 89
A.1 Prognosekaarten_2023 89
A.2 Dalingstijdreeksen rijpingsterreinen_2023 89
A.3 Dalingstijdreeksen rijpingsterreinen_2023_incl_prognose 89
A.4 DalingssnelheidskaartAHN2,3,4 89
A.5 Voxelmodel_2023 89

B n-factor 90

C Afleiding factor voor volumeverlies door rijping 91

D Resultaten gevoeligheidsanalyse per locatie met toelichting 92
D.1 ZF.A 92
D.2 ZF.B 93
D.3 ZF.C 94
D.4 ZF.D 95
D.5 ZF.E 96
D.6 OF.A 97
D.7 OF.B 98
D.8 NOP.A 99
D.9 NOP.B 100
D.10 NOP.C 101
D.11 Toelichting 102

E Voxelmodel kaartbeelden 104
E.1 Lithoklassen (bodemdeel) 104
E.2 Rijpingsklassen (bodemdeel) 106
E.3 Massapercentage lutum (bodemdeel) 108
E.4 Massapercentage organische stof (bodemdeel) 110
E.5 Trofiegraad van het veen; veentype 112

1 Introductie

1.1 Aanleiding en opdracht

Provincie Flevoland en waterschap Zuiderzeeland hebben een gezamenlijke verantwoordelijkheid voor het creëren, onderhouden en aanpassen van randvoorwaarden waarbinnen de functies wonen, werken, landbouw en natuur zo optimaal mogelijk kunnen bestaan. Een goed functionerende waterhuishouding en een goede bodemgesteldheid zijn essentiële onderdelen van die randvoorwaarden. Eén van de factoren die bodemgesteldheid en de waterhuishouding in de loop van de tijd veranderen, en waar beide overheden rekening mee moeten en willen houden, is de bodemdaling in het beheergebied. Bodemdaling is relevant voor actuele beleidsopgaven van de provincie zoals de stedelijke gebiedsontwikkeling en klimaatadaptatie. Een prognose van bodemdaling is onder andere nodig voor de watersysteemtoets waarvan de eerstvolgende in 2024 zal plaatsvinden.
De meest recente gebiedsdekkende bodemdalingsprognose dateert van ruim tien jaar geleden (De Lange e.a., 2012). Omdat wetenschappelijke inzichten en datasets rond bodemdaling zich snel ontwikkelen, hebben waterschap Zuiderzeeland (ZZL) en de provincie Flevoland (PFL) Deltares eind 2021 gevraagd om samen met WENR en TNO een voorstudie te doen voor een nieuwe prognose. In de voorstudie is de vorige bodemdalingsprognose uit 2012 geëvalueerd en is op grond van de ontwikkeling van kennis en technische mogelijkheden een aantal mogelijkheden voor de aanpak van een nieuwe prognose geformuleerd (Kooi e.a., 2022). Op basis daarvan hebben het waterschap en de provincie een voorkeursaanpak gekozen en is aan de genoemde partners de opdracht gegeven om de nieuwe prognose op te stellen. Dit rapport doet verslag van uitgevoerde werkzaamheden en geeft een toelichting op de geproduceerde kaarten en aanvullende producten.

1.2 Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit een algemeen deel (Hoofdstukken 2 t/m 5) en een technische toelichting (Hoofdstuk 6 en verder, inclusief bijlagen). Het algemene deel beschrijft het project op hoofdlijnen en presenteert de nieuwe prognose. Dit deel is zelfstandig te lezen. Voor verdieping wordt verwezen naar hoofdstukken van de technische toelichting.
In het technische deel wordt uitgebreider ingegaan op de uitgevoerde deelstudies, keuzes die op basis van die studies zijn gemaakt, en op de meer technische aspecten van de productiewijze van de prognose. In deze hoofdstukken worden diverse aanvullende producten gepresenteerd zoals schattingen van de opgetreden bodemdaling op basis van metingen en kaarten met ondergrondinformatie. Deze hoofdstukken zijn met name bedoeld voor de meer technisch onderlegde en geïnteresseerde lezer.
De vorige en de nieuwe prognose worden verder respectievelijk aangeduid met *prognose 2012* en *prognose 2023*.

I Algemeen deel

2 Uitgangspunten

Op basis van de voorstudie (Kooi e.a., 2022) is door ZZL en de provincie Flevoland een aantal uitgangspunten geformuleerd voor de vervaardiging van de prognose. De belangrijkste uitgangspunten worden toegelicht in dit hoofdstuk. Hoofdstuk 3 (beschrijving van de werkwijze) bevat enkele aanvullende uitgangspunten die meer in detail invulling geven aan deze hoofduitgangspunten. De hoofduitgangspunten zijn de volgende.

1. *Baseer de prognose op berekeningen die starten bij de actuele situatie.*

   Dit wijkt af van de aanpak van *prognose 2012* waarin berekeningen startten vanaf het moment van drooglegging van de polders. De reden voor de andere aanpak is drieledig:
   - De bijdrage van de verschillende processen die de bodemdaling verklaren zijn steeds minder bepaald door de grote veranderingen die plaatsvonden bij de drooglegging; het historische verleden heeft nu weinig voorspellende waarde meer.
   - Anders dan bij de vorig prognose, is nu meer informatie beschikbaar over de ‘actuele’ bodemopbouw en de ‘actuele’ grondwatersituatie.
   - Een rekenwijze op basis van de actuele situatie sluit aan bij de rekenwijze die voor de rest van Nederland wordt gebruikt voor de nationale bodemdalingsvoorspellingskaarten. Zie ook punt 3.

2. *Maak in het procesmodel onderscheid naar rijping/krimp, compactie en veenoxidatie[2] (zie Box 1). Voor veenoxidatie moet bekeken worden in hoeverre de oxidatiesnelheid die wordt gehanteerd voor de nationale bodemdalingsvoorspellingskaarten, en die gebaseerd is op langjarige metingen in het veenweidegebied van Zuid Holland, aanpassing behoeft voor de Flevolandse situatie, waarbij o.a. veentype en de dikte van het minerale dek een rol kan spelen.*

3. *Ga voor de prognose uit van een vast streefpeil en een gematigd scenario voor klimaatverandering (KNMI’14 GL-scenario)[3]. Hanteer de zichtjaren 2030, 2036, 2050, 2085 en 2100. Gebruik een resolutie van de kaartbeelden die past bij de gebruikte brondata[4]. Prognosekaarten betreffen:*
   (A) maaiveldhoogte (inclusief referentie/actuele hoogte);
   (B) bodemdaling (maaiveldhoogtezakking);
   (C) individuele bijdragen van veenoxidatie, rijping en compactie aan (B);
   (D) een kaartbeeld met een expert-judgement van de bandbreedte van (B) om een beeld te geven van de nauwkeurigheid/betrouwbaarheid van de schatting
   (E) de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) (inclusief referentie/actueel);
   (F) drooglegging (inclusief referentie/actueel)

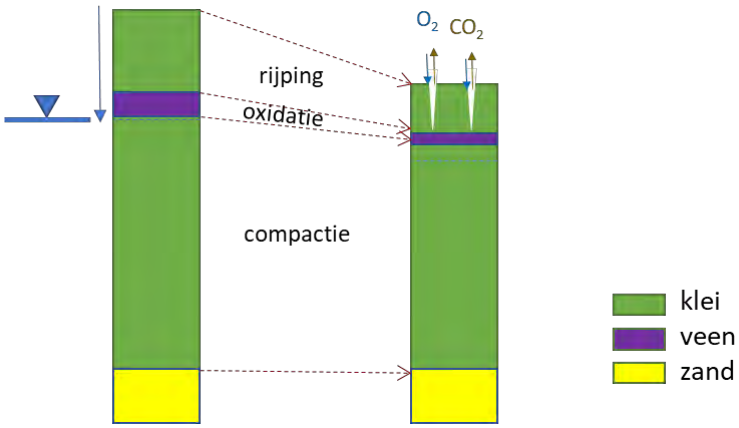
4. *Stedelijk gebied maakt géén deel uit van de prognose met uitzondering van Oosterwold.*

   De reden om bebouwd gebied buiten beschouwing te laten is dat maaiveldhoogteverandering in stedelijk gebied gecompliceerd is door renovaties/ophogingen, de daling sterk wordt bepaald door de wijze waarop wijken

[2] In de vorige prognose werden rijping/krimp en compactie niet als onderscheidende processen gemodelleerd. Box 1 geeft een korte omschrijving van de drie deelprocessen.
[3] Aanvullende scenario’s kunnen in een aanvullende opdracht vrij snel worden toegevoegd.
[4] Niet te grof, maar ook niet te fijn om schijnnauwkeurigheid te vermijden.

bouwrijp zijn gemaakt en/of gerenoveerd, en de ruimtelijke variatie van bodemdaling over het algemeen sterk kan verschillen voor wegdelen, bermen/parken, sportvelden e.d. Prognose in de stedelijke omgeving vraagt om een andere benadering. Voor Oosterwold gelden deze beperkingen niet, of in mindere mate. Het plangebied “Oosterwold” ten zuidoosten van Almere wordt vooralsnog betiteld als landelijk gebied.

Box 1: De drie onderscheiden bodemdalingsprocessen



Rijping/krimp
Rijping vindt plaats bij het droogvallen (drainage/ontwatering) van klei-rijke sedimenten die onder water zijn afgezet. Luchtindringing in de bodem zet veranderingen in gang waarbij het slappe sediment geleidelijk verandert in een stevige, doorlatende bodem met structuur. Dat gaat gepaard met een onomkeerbaar verlies aan water en een aanzienlijk volumeverlies. Dit volumeverlies wordt ook wel krimp genoemd. Wateronttrekking door begroeiing versnelt het rijpingsproces aanzienlijk. Door het volumeverlies ontstaan rijpingsscheuren in de bodem en treedt maaivelddaling op. Rijping vindt dus vrij ondiep plaats in het bodemprofiel, namelijk tot waar lucht in de bodem dringt.

In de Flevopolders was rijping (krimp) een hoofdoorzaak van de bodemdaling door de drooglegging van de waterbodems van het IJsselmeer. Grote delen van het minerale dek zijn inmiddels sterk gerijpt waardoor een verdere bijdrage aan bodemdaling afwezig of beperkt is. Op diverse locaties in Flevoland komen echter nog ongerijpte of onvolledig gerijpte bodemhorizonten voor. Dat betekent dat op deze locaties ook nu nog rekening moet worden gehouden met een rijpingsbijdrage (restrijping).

Oxidatie
De bodem van Flevoland bevat veen en organisch-rijke klei. Door ontwatering van deze bodemlagen kan zuurstof de bodem indringen. Met de beschikbaarheid van zuurstof wordt het organisch materiaal door bacteriën afgebroken (hetzelfde als het vergaan van bladeren en hout in een bos). Met het verdwijnen van het organisch materiaal verliest de bodem volume en ontstaat bodemdaling. Dit bodemdalingsproces wordt aangeduid met de term ‘oxidatie’. Deze oxidatie onder invloed van zuurstof vindt dus ook vrij ondiep plaats in het bodemprofiel, namelijk tot waar lucht en zuurstof de bodem indringt.

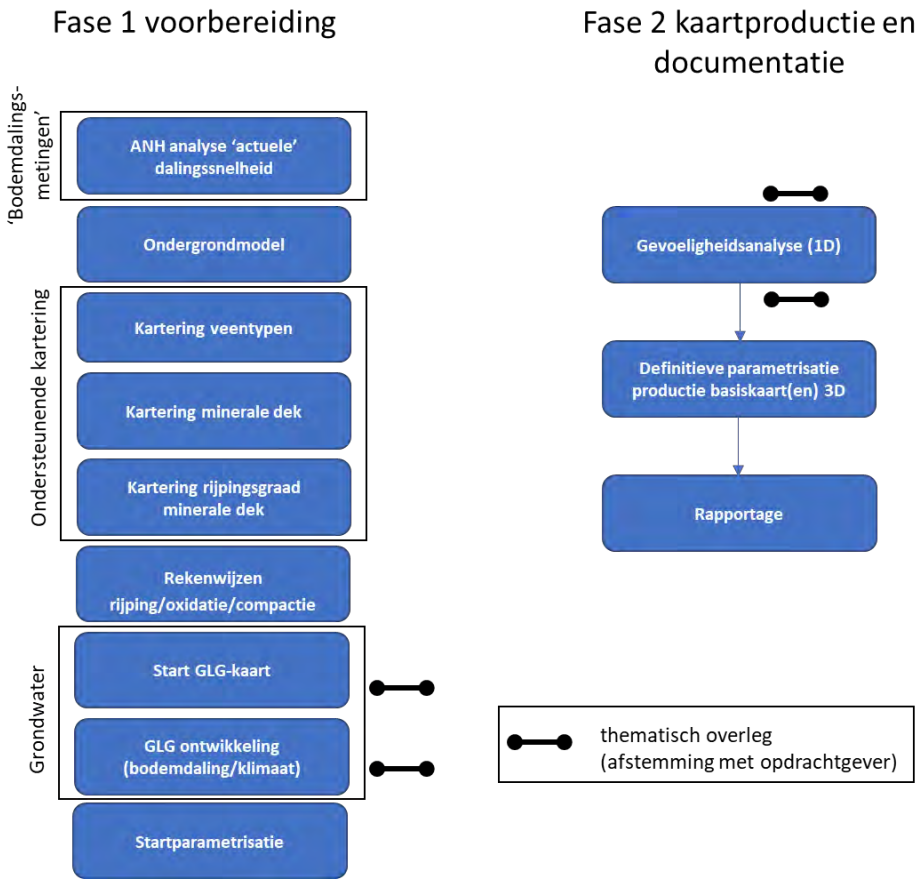
Compactie
Beneden de diepste grondwaterstand is de porieruimte in de bodem gevuld met (grond)water. Wanneer de waterdruk van het grondwater wordt verlaagd krijgt het korrelskelet meer van het gewicht van de bovenliggende grondlagen te dragen en wordt het korrelskelet samengedrukt; er treedt verdichting op, wat gepaard gaat met volumeverlies. Dit wordt compactie genoemd.

Met name veen- en kleilagen in de ondergrond van Flevoland zijn daar gevoelig voor. Compactie wordt onder andere veroorzaakt door verlaging van de grondwaterstand. Een deel van de compactie gebeurt vrij snel na een grondwaterstandsverlaging. Een ander deel (aangeduid met de term kruip) gebeurt heel langzaam en kan vele decennia doorwerken. Compactie vindt dus relatief diep in de ondergrond plaats. Voor de bodemdalingsprognose wordt compactie tot zo'n tien meter onder het maaiveld in rekening gebracht.

3 Aanpak

De berekeningen en kaartproductie zijn gedaan met Atlantis (Bootsma e.a. 2020; Erkens e.a. 2021). Atlantis is een open source productieomgeving waarmee Deltares, TNO en WENR bodemdalingsvoorspellingen maken op basis van een 3D ondergrondmodel (voxelmodel). Door gebruik van Atlantis kunnen nieuwe prognoses of aanvullende scenario's in de toekomst sneller en makkelijker worden gemaakt, en geïntegreerd in de landelijke kaarten. Bovendien wordt de productieomgeving Atlantis doorontwikkeld met eigen financiering vanuit de onderzoeksinstituten. Atlantis wordt in meer detail toegelicht in hoofdstuk 6.

Het project is uitgevoerd in twee fasen (Figuur 1). Fase 1 omvat voorbereidende werkzaamheden, gericht op ontwikkelen en operationeel maken van de rekenwijze en benodigde (input)datasets. In fase 2 zijn de bodemdalingsberekeningen verricht om de voorspellingskaarten te produceren en is de rapportage ondergebracht.
In deze sectie worden de verschillende stappen in beide fasen kort toegelicht. In de technische toelichting worden de stappen, keuzes en resultaten in detail beschreven.



Figuur 1 Overzicht van de verschillende activiteiten die onderdeel uitmaken van de gebruikte werkwijze, ondergebracht in een voorbereidende fase en een fase van kaartproductie en documentatie. Bij drie activiteiten heeft thematisch overleg plaatsgevonden waarin keuzes in de uiteindelijke werkwijze zijn afgestemd met de opdrachtgevers. Bij de activiteit 'startparametrisatie en gevoeligheidsanalyse' betrof dat twee overleggen, één over de uitvoering van de gevoeligheidsanalyse en één over de verwerking van de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse. De voorbereidende activiteiten konden grotendeels onafhankelijk van elkaar worden verricht (geen duidelijke volgordelijkheid).

3.1 Fase 1 Voorbereidende werkzaamheden

'Bodemdalingsmetingen'
De opgestelde prognose betreft de ontwikkeling van de maaiveldhoogte vanaf 2020. Het is daarbij wenselijk dat de bodemdalingssnelheid bij de start, rond 2020, zo goed mogelijk aansluit bij onafhankelijke bodemdalingsmetingen rond die tijd. Gerichte bodemdalingsmetingen bestaan echter niet voor het landelijk gebied in Flevoland. Wel kunnen hoogtebestanden worden gebruikt om een beeld van de bodemdaling te verkrijgen. Daarbij moet nadrukkelijk rekening worden gehouden met de beperkte nauwkeurigheid van de hoogtewaarden. Voor dit project is een analyse gemaakt van de bodemdalingssnelheid over de periode 2009-2020 (Zuidelijk en Oostelijk Flevoland) en de periode 2009-2022 (Noordoostpolder) op basis van het actueel hoogtebestand Nederland (AHN). Dit leverde een kaart op voor de snelheid én een foutschatting van de snelheid (pararaaf 7.2.2). Ook zijn AHN hoogteschattingen voor de locaties van de voormalige rijpingsterreinen gemaakt en toegevoegd aan de databestanden van ZZL voor deze terreinen. De resultaten hiervan zijn opgenomen in een Excel bestand en een nieuwe set figuren die een schatting opleveren voor de bodemdaling sinds de drooglegging (digitale bijlage 19A.2).

Ondergrondmodel
Er is een model van de ondergrond van Flevoland gemaakt dat de opbouw van de ondergrond beschrijft in termen van grondsoorten (lithoklassen veen, klei, zand, zavel). Het ondergrondmodel is een voxelmodel, d.w.z., een ruimtelijk model dat is opgebouwd uit horizontale lagen die elk bestaan uit aaneengesloten identieke blokken. Elke laag heeft een dikte van 0,2 m, elk blok meet 100 m bij 100 m in het horizontale vlak en is 0,2 m dik. Voor het "diepere deel" - dieper dan 1,6 m onder maaiveld - is gebruik gemaakt van een bestaand model dat gemaakt is ten behoeve van het AZURE grondwatermodel (Gunnink, 2021). De bovenste 1,6 m van dit model is geactualiseerd op basis van recente bodemgegevens die zijn verzameld in de periode 2012 tot en met 2018 door WENR en die zijn opgenomen in de Basisregistratie Ondergrond (BRO). Sinds de drooglegging van de polders zijn vooral ondiepe bodemlagen sterk in dikte afgenomen. Het gebruik van de recente gegevens was dus nodig om een accuraat model te verkrijgen voor de actuele situatie.

Ondersteunende kartering
Om geschikte rekenwijzen voor bodemdaling door oxidatie en door rijping op te stellen en te voorzien van een passende parametrisatie is een aantal karteringen verricht. Eén kartering betrof de mate van rijping van het minerale dek. Deze informatie is diepteafhankelijk gekarteerd voor een grote set boringen (hoofdstuk 9). Een tweede kartering betrof onderscheidende typen veen die zich onder het minerale dek bevinden (hoofdstuk 10). Oorspronkelijk was het de bedoeling om ook een kartering van dikte en samenstelling van het minerale dek uit te voeren (Figuur 1) vanuit de gedachte dat dit mogelijk zou kunnen worden gebruikt om de beschermende werking van dit dek tegen veenoxidatie in de prognoseberekeningen op te nemen. Omdat bleek dat de beschermende werking daarmee echter niet verduidelijkt kon worden is ervoor gekozen deze kaart niet te maken maar deze te vervangen door een kaart met de diepte waarop veraard veen wordt aangetroffen (paragraaf 12.2.2).

Rekenwijzen bodemdalingsprocessen
Voor de drie onderscheiden bodemdalingsprocessen (uitgangspunt 2 in hoofdstuk 2) zijn de rekenwijzen vastgesteld. Daarvoor zijn de volgende onderzoeken verricht en aanpassingen gedaan in het rekenmodel van Atlantis.

Rijping. Voor bodemdaling door rijping is een aparte rekenwijze ontwikkeld en gecodeerd in Atlantis (hoofdstuk 11). Daarvoor is onderzocht welke rekenwijze het beste aansluit bij

de actuele kennis over bodemdaling door rijping in de literatuur en bij de projectpartners. Ook zijn datasets voor de rijpingstoestand en grondwaterstand bestudeerd om verband te kunnen leggen tussen het dieptebereik van rijping en de gemiddeld diepste grondwaterstand (GLG). De ondersteunende kartering van de rijpingsgraad van het minerale dek is gebruikt voor de parametrisatie van het ondergrondmodel.

Veenoxidatie. Voor de rekenwijze voor veenoxidatie is onderzocht of de modelparameters die worden gebruikt in Atlantis kunnen worden afgestemd op de Flevolandse situatie (hoofdstuk 12). Daarbij is gekeken naar vier aspecten.
(1) In de ondergrond van Flevoland komen verschillende typen veen voor. Deze veentypen zijn in beeld gebracht in de ondersteunende kartering. Literatuuronderzoek is verricht om te zien in hoeverre de oxidatiesnelheid van deze veentypen verschilt. Daaruit bleek dat de wetenschappelijke basis vooralsnog onvoldoende is om dit betrouwbaar/betekenisvol te kunnen kwantificeren. Er is daarom uiteindelijk geen ruimtelijke differentiatie naar veentype toegepast in de productie van de prognosekaart.
(2) In Flevoland ligt het veen onder een mineraal dek (zand, klei, zavel) dat varieert in samenstelling en dikte. Wanneer het dek de zuurstofindringing beperkt, kan dit de oxidatiesnelheid van het onderliggende veen beperken. Verkenning van de literatuur liet ook hier zien dat er onvoldoende wetenschappelijke basis is om de parametrisatie van Atlantis op dit punt aan te passen. Er is daarom geen ruimtelijke differentiatie in de veenoxidatiesnelheid toegepast voor de invloed van minerale dek karakteristieken in de productie van de prognosekaart[5].
(3) De droge bulkdichtheid van het veen in Flevoland is bestudeerd en vergeleken met landelijke datasets. Daaruit bleek dat de gebruikelijke waarde voor droge bulkdichtheid van veen die wordt gebruikt in Atlantis ook voor Flevoland passend is.
(4) Met behulp van berekeningen en bestaande veldmetingen is onderzocht tot welke niveau ten opzichte van de GLG lucht (en zuurstof) de bodem kan indringen (voor karakteristieke bodemprofielen in Flevoland en veenweide in het Groene Hart). Ook is de diepte onderzocht waar in Flevoland veraard veen wordt aangetroffen.
De resultaten van de vier genoemde deelstudies zijn gebruikt bij het maken van de keuze van startwaarden voor relevante modelparameters en om bandbreedtes voor deze parameters te kiezen voor gebruik in de gevoeligheidsanalyse in fase 2. In de berekeningen neemt de oxidatiesnelheid van het veen geleidelijk toe in de tijd door de opwarming van de bodem voor het KNMI'14 GL-scenario.

Compactie. Voor dit proces bestond geen aanleiding om de huidige rekenwijze aan te passen. Er zijn geen specifieke nieuwe werkzaamheden verricht. De meest actuele implementatie in Atlantis is zonder aanpassing gebruikt.

Grondwater
In de huidige versie van Atlantis is de gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG) de maatgevende freatische grondwaterstand in de rekenwijzen voor de bodemdalingsprocessen. Dit uitgangspunt is gehandhaafd in dit project. Voor de berekeningen is een kaart nodig voor de actuele GLG bij de start van de berekeningen én moeten aannames worden gedaan over hoe de GLG zich ontwikkelt naar de toekomst. De werkzaamheden hiervoor zijn verricht in de stappen 'Start GLG-kaart' en 'GLG ontwikkeling (bodemdaling/klimaat)' (Figuur 1), en worden beschreven in hoofdstuk 14.
De keuze voor de startsituatie was een uitgangspunt: de GLG-kaart is betrokken uit het meest recente Water Diepte Model (WDM) van WENR voor de provincie.

[5] Aanwezigheid van mineraal dek beperkt wel de bodemdaling door oxidatie in de berekeningen omdat er daardoor een geringere veendikte aanwezig is in het dieptebereik waarin oxidatie kan plaatsvinden in vergelijking met de situatie zonder mineraal dek.

De GLG ontwikkeling vanaf de startconditie naar de toekomst bevat twee bijdragen: (1) de ontwikkeling door het gekozen klimaatscenario (uitgangspunt 3 in hoofdstuk 2) en (2) de ontwikkeling onder invloed van de bodemdaling. In overleg met de opdrachtgever is besloten om géén verandering GLG voor klimaatverandering toe te passen maar dit te verschuiven naar een update waarin de nieuwe klimaatscenario's 2023 van het KNMI worden ingezet. Dit doet geen afbreuk aan de *prognose 2023* omdat de invloed van het gematigde klimaatscenario KNMI'14 GL naar verwachting marginaal zijn.

Startparametrisatie
Met de resultaten van bovengenoemde werkzaamheden is een startparametrisatie opgesteld voor de bodemdalingsberekeningen met Atlantis (hoofdstuk 15). Drie parameters voor de rijpingsberekeningen, waaronder het rijpingsgetal dat de mate van rijping weergeeft, zijn ruimtelijk gemodelleerd met behulp van de uitgevoerde karteringen.

3.2 Fase 2 Berekeningen, kaartproductie en rapportage

Gevoeligheidsanalyse en definitieve parametrisatie
In de gevoeligheidsanalyse is voor een aantal geselecteerde parameters, inputbestanden en aannames, onderzocht in welke mate de bodemdalingsprognose verandert wanneer voor deze elementen (binnen redelijke grenzen) andere keuzes worden gemaakt (hoofdstuk 16). De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn gebruikt om de definitieve parametrisatie voor de basisprognose(kaart) vast te stellen, en om parametersets te kiezen voor een hogere en lagere bodemdalingsprognose(kaart) die de onzekerheid (en bandbreedte) van de prognose in beeld brengen (uitgangspunt 4 in hoofdstuk 2) (hoofdstuk 17). De gevoeligheidsanalyse is gedaan voor tien geselecteerde locaties in de provincie, door berekeningen op representatieve bodemkolommen voor die locaties. De geproduceerde kaartenset wordt besproken in hoofdstuk 4 en is beschikbaar in een digitale bijlage 19A.1.

3.3 Belangrijkste verschillen ten opzichte van prognose 2012

De belangrijkste verschillen in de uitgangspunten en werkwijze die zijn gehanteerd in vergelijking met bodemdalingprognose 2012 (De Lange e.a., 2012) zijn:

- De prognose is gekoppeld aan een ander startjaar; 2020 in plaats van 2011.

- *Prognose 2012* is gemaakt op basis van een retrospectieve benadering die sterk wordt geleid door de modellering van de historische ontwikkeling vanaf de drooglegging van de verschillende polders. Voor *prognose 2023* is overgestapt op een benadering die wordt gestuurd vanuit de 'actuele situatie'. Deze benadering is meer 'toekomstbestendig' om de volgende redenen:
- De bijdrage van de verschillende processen aan de bodemdaling zijn steeds minder bepaald door de grote veranderingen die plaatsvonden bij de drooglegging; het historische verleden heeft nu naar verwachting weinig voorspellende waarde meer.
- Anders dan bij *prognose 2012*, is nu (en in de toekomst) meer informatie beschikbaar over de 'actuele' bodemopbouw en de 'actuele' grondwatersituatie.
- Een rekenwijze op basis van de actuele situatie sluit aan bij de rekenwijze die voor de rest van Nederland wordt gebruikt voor de nationale bodemdalingsvoorspellingskaarten. Daarmee kan de prognose voor Flevoland beter worden geïntegreerd in de nationale prognose waar periodiek updates voor worden gemaakt.

- Eén van de kritieken die zijn geleverd op *prognose 2012* betrof het ontbreken van een expliciet rijpingsmodel. Het rijpingsgedrag werd verondersteld impliciet te zijn meegenomen het compactiemodel. Voor *prognose 2023* is een aparte rekenwijze voor rijping ontwikkeld en toegepast.

- Er is voor *prognose 2023* zoveel mogelijk gebruik gemaakt van voor de BRO ontwikkelde datasets. Dat is belangrijk voor de kwaliteitsborging. Bovendien kan efficiënt gebruik worden gemaakt van updates van deze datasets. Het betekent niet dat het niet mogelijk is om ook provinciale datasets te integreren.

- De resolutie van de prognose is verhoogd van 250 m x 250 m naar 100 m x 100 m.

- Er is een duidelijkere en expliciete werkwijze opgenomen voor hoe de GLG wordt beïnvloed door maaivelddaling.

- Hoewel het niet mogelijk is om een objectieve, kwantitatieve maat voor de onzekerheid van de prognose te maken, is voor *prognose 2023* (in tegenstelling tot prognose 2012) een indicatieve, kwantitatieve onzekerheid toegevoegd in de vorm van een lage en hoge bodemdalingsschatting. Ook is meer inzicht verschaft in de gevoeligheid van de prognose voor diverse parameters in de berekeningen.

- De productie van onderliggende datasets zijn vastgelegd in scripts wat maakt dat deze datasets beter reproduceerbaar en updatebaar zijn. De rekenwijze is evenzeer vastgelegd in scripts in de productieomgeving Atlantis. Dit alles maakt dat aanvullende scenariokaarten en updates van de prognose veel efficiënter kunnen worden opgesteld dan ten tijde van *prognose 2012*.

4 De prognosekaart(en)

4.1 Overzichtstabel

Tabel 1 geeft een overzicht van de geproduceerde prognosekaarten voor de verschillende zichtjaren. 2020 is het startjaar van de prognose. De kaarten zijn opgenomen in digitale bijlage 19A.1bij dit rapport. Elke kaart is beschikbaar in png-formaat voor eenvoudige visualisatie en in tiff-formaat voor gebruik in specialistische software voor digitale verwerking.

Er is onderscheid gemaakt naar hoofdkaarten en bijkaarten. De hoofdkaarten bestaan uit kaarten die de maaiveldhoogteontwikkeling tonen en kaarten die de bodemdaling vanaf (januari) 2020 tonen. Voor elk zichtjaar bestaat de bodemdalingsprognose uit drie kaarten: de basisprognose, een lage schatting en een hoge schatting. Dit verschaft een beeld van de onzekerheid in de prognose.
De bijkaarten leveren aanvullende informatie over bijdrage aan de (totale) bodemdaling door rijping, oxidatie en compactie, de diepte van de GLG onder maaiveld en de drooglegging[6].

Tabel 1 overzicht van de vervaardigde kaarten en bijbehorende zichtjaren.

	2020	2030	2036	2050	2085	2100
Hoofdkaarten						
Maaiveldhoogte	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bodemdaling* (totaal); basis, lage en hoge prognose (drie kaarten per zichtjaar)		✓	✓	✓	✓	✓
Bijkaarten						
Bodemdaling rijping		✓	✓	✓	✓	✓
Bodemdaling oxidatie		✓	✓	✓	✓	✓
Bodemdaling compactie		✓	✓	✓	✓	✓
GLG (-mv)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Drooglegging	✓	✓	✓	✓	✓	✓

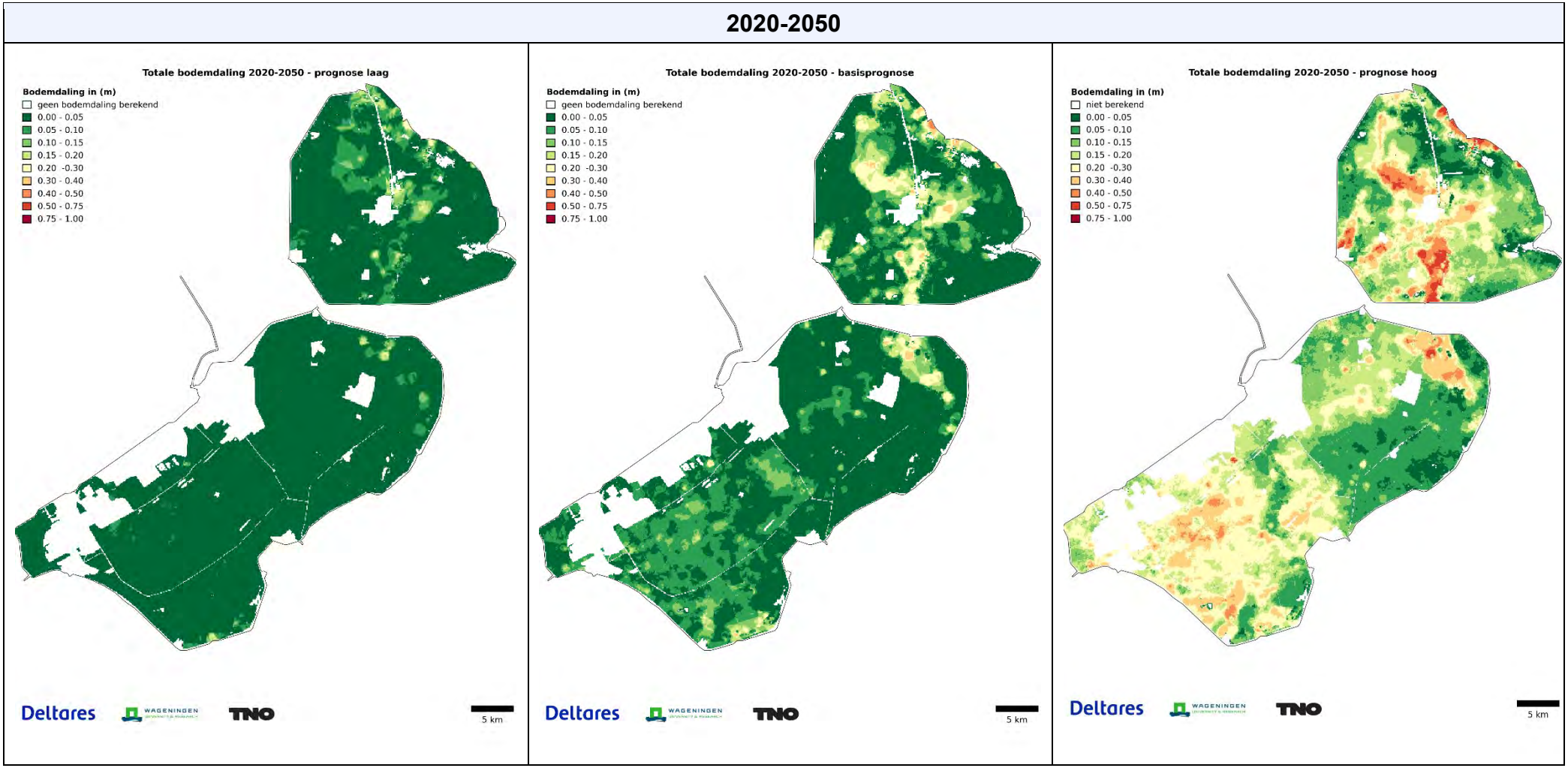
* = maaivelddaling

Naast de prognosekaarten hebben de werkzaamheden ook andere producten opgeleverd zoals rekenwijzen, een ondergrondmodel, kaarten en inzichten rond veen en rijping van het minerale dek en ‘bodemdalingsmetingen’. Veel van deze producten zijn belangrijk omdat ze efficiënte updates van de bodemdalingsprognose in de toekomst mogelijk maken. Deze producten worden gepresenteerd in de technische toelichting, deel II.

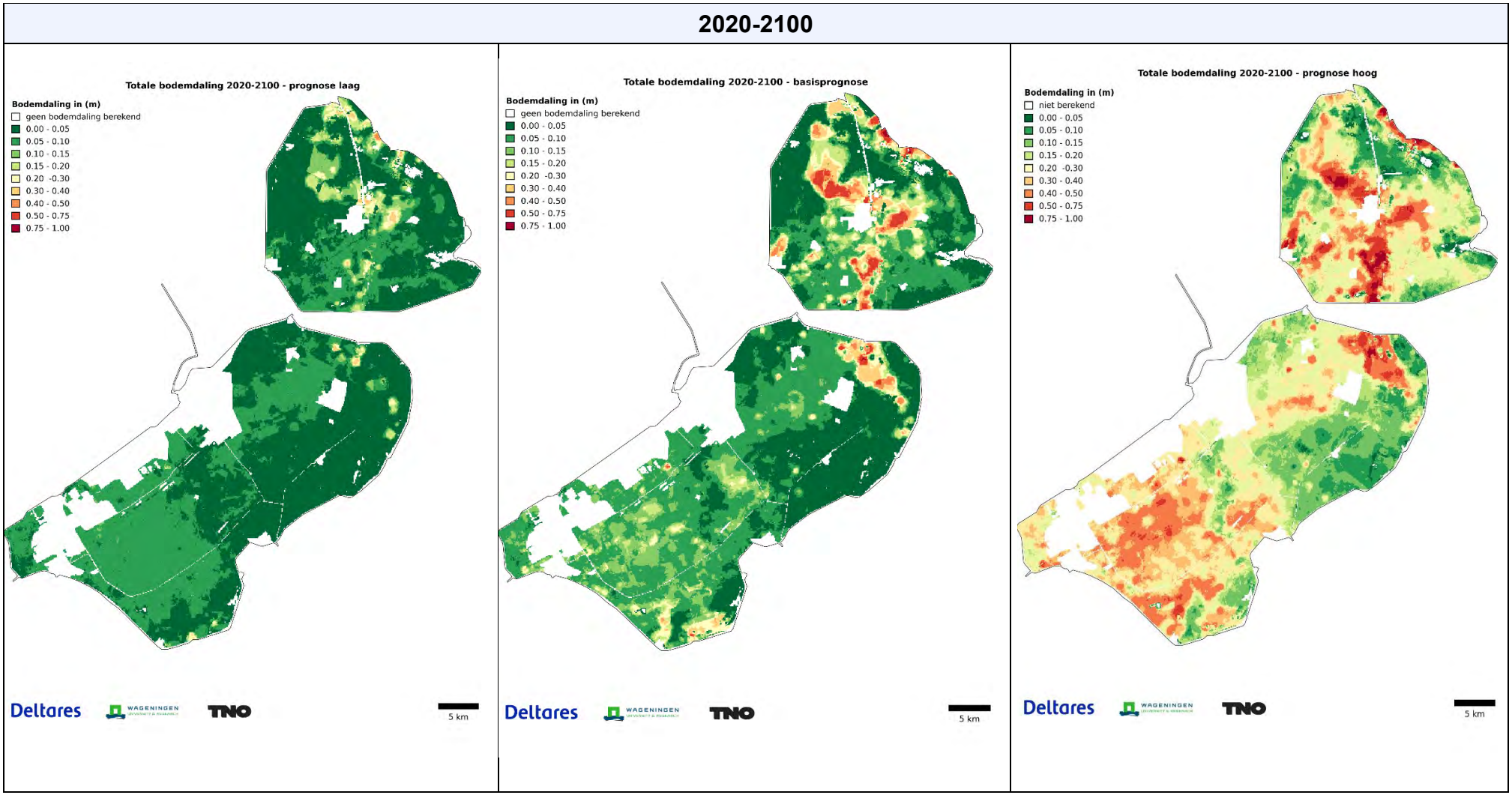
4.2 Impressie en kengetallen van de bodemdalingsprognose

De bodemdalingsprognosekaarten voor zichtjaren 2050 en 2100 zijn respectievelijk afgebeeld in Figuur 2 en Figuur 3.

[6] het verschil tussen maaiveldhoogte en het waterpeil.



Figuur 2 Bodemdalingsprognose voor de periode 2020-2050; links: lage prognose, midden: basisprognose (beste schatting); rechts: hoge prognose.



Figuur 3 Bodemdalingsprognose voor de periode 2020-2100; links: lage prognose, midden: basisprognose (beste schatting); rechts: hoge prognose.

De meest prominente bodemdalingsgebieden in de prognose zijn te vinden in de Noordoostpolder (NOP) en ten noorden van Dronten in Oostelijk Flevoland (OF) (de oranje/rode gebieden op de basiskaart en zichtjaar 2100). In deze gebieden levert veenoxidatie de belangrijkste bijdrage aan de bodemdaling[7]. De bodemdaling in Zuidelijk Flevoland (ZF) is relatief geringer in de prognose en onzeker (vrijwel afwezig in de lage prognose). Het relatief dikke minerale dek beschermt het veen daar tegen veenoxidatie, met uitzondering van het meest zuidelijke deel van ZF, waar de deklaag dun is. In centrale delen van ZF levert rijping daardoor (nog steeds) de belangrijkste bijdrage in de basisprognose. Op veel plaatsen in ZF is de bescherming tegen veenoxidatie door de deklaag echter marginaal. Een verlaging van de GLG kan er daarom toe leiden dat veenoxidatie het dominante proces wordt en de bodemdaling versnelt. Het is niet uitgesloten dat veenoxidatie nu al op uitgebreidere schaal plaatsvindt in ZF. Dat is verwerkt in de hoge prognosekaart.

De verschillen tussen de basisprognose enerzijds en de hoge en lage prognose anderzijds, laten zien dat de onzekerheid van de prognose in grote delen van de provincie groot is. Dat komt omdat de bodemdalingsprocessen gevoelig zijn voor kleine verschillen in de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) en diverse bodem- en modelparameters (hoofdstuk 16), en deze met een beperkte nauwkeurigheid bekend zijn (o.a. hoofdstukken 14 en 15). De prognose geeft daarmee vooral inzicht in bodemdalingsgevoelige gebiedsdelen waar (grond)waterbeheer een groot verschil kan maken. De verschillen in dalingsbeeld met *prognose 2012* worden besproken in paragraaf 4.3.

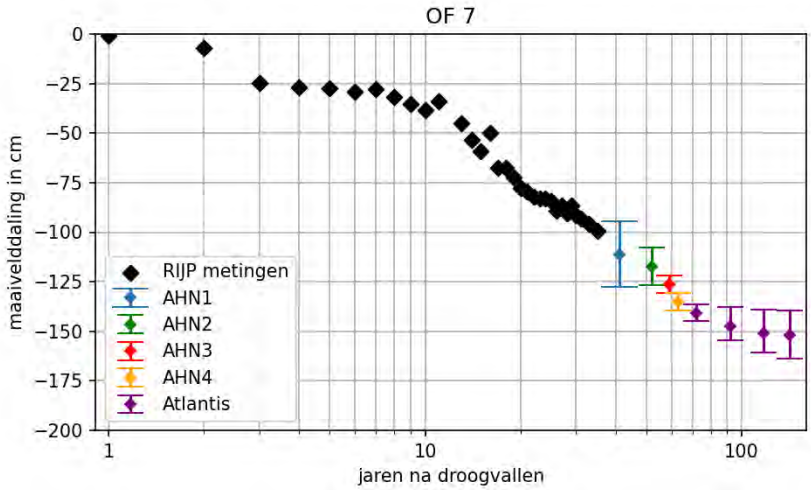
Tabel 2 geeft de gemiddelde bodemdaling in de provincie als geheel en voor de individuele polders.

Tabel 2 Gemiddelde daling (in cm) voor het oppervlak waarvoor de prognose is gedaan

gebied	**2020-2050**			**2020-2100**		
	laag	basis	hoog	laag	basis	hoog
Gemiddelde daling totaal	2,9	5,8	17,9	5,2	9,9	31,8
Gemiddelde daling ZF	3,2	6,0	22,9	5,8	9,9	40,6
Gemiddelde daling OF	2,3	4,2	13,7	4,2	7,1	24,1
Gemiddelde daling NOP	3,3	7,3	18,5	5,7	12,6	33,1

Voor de locaties van de voormalige rijpingsterreinen is de prognose ook zichtbaar gemaakt in grafieken die de tijdontwikkeling van de bodemdaling weergeven sinds de drooglegging. Deze grafieken zijn opgenomen in digitale bijlage 19A.3 bij dit rapport. Figuur 4 toont een voorbeeld voor rijpingsterrein OF 7 in Oostelijk Flevoland. De prognose is te zien in het rechterdeel van de grafiek (legenda-time ‘Atlantis’), waarbij de uiteinden van de ‘error bars’ corresponderen met de lage en hoge prognose. Over het algemeen - Figuur 4 is daar een voorbeeld van - past het trendbeeld van de prognose én de onzekerheidsschatting goed bij het beeld dat volgt uit de ‘metingen’. Voor sommige voormalige rijpingsterreinen is de hoge prognose mogelijk een overschat als wordt afgegaan op een zichtbare ‘trendbreuk’ met de voorgaande periode. Een daadwerkelijke ‘recente’ trendbreuk kan echter niet worden uitgesloten, bijvoorbeeld wanneer door ingrepen in perceeldrainage de GLG verlaagd is.

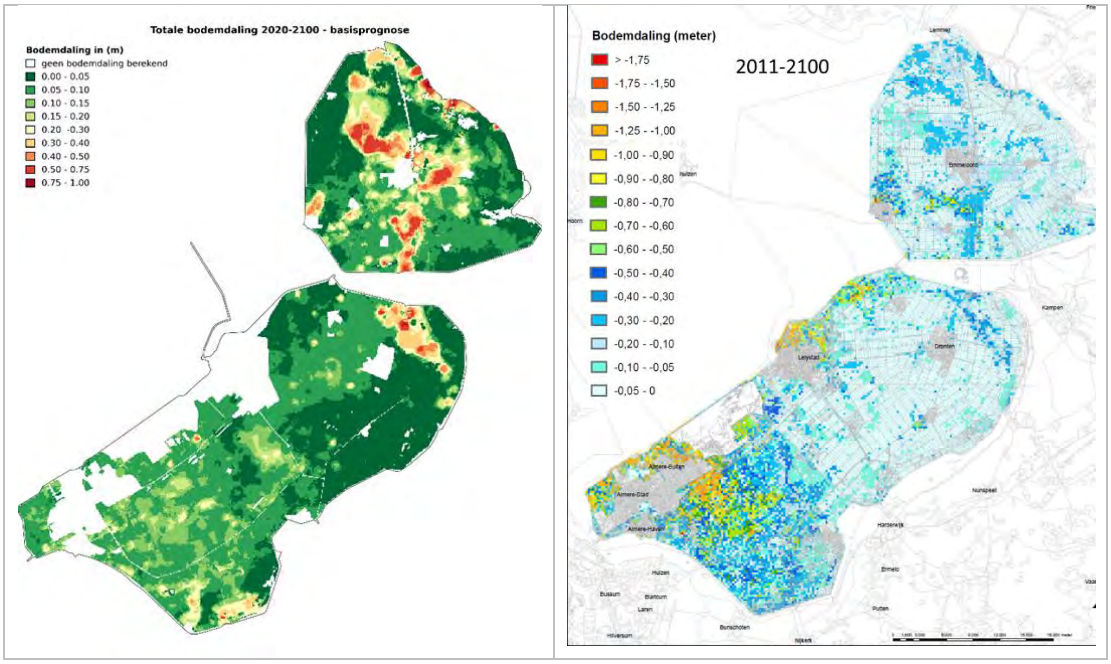
[7] De bijdragen van de drie bodemdalingscomponenten kunnen worden bestudeerd aan de hand van de bijkaarten in digitale bijlage 19A.1.



Figuur 4 Grafiek van de tijdontwikkeling van de bodemdaling op de locatie van een voormalig rijpingsterrein (OF 7). 'Atlantis' (paars) geeft de bodemdalingsprognose weer, waarin het symbool de basisprognose laat zien. De prognose is opgeteld bij de bodemdaling van AHN4 (in 2020)). De extremen van de 'error bar' corresponderen met de hoge en lage prognose. De andere informatie in de grafiek betreffen bodemdalingsschattingen uit maaiveldhoogtemetingen. Voor een toelichting daarvan wordt verwezen naar paragraaf 7.1.2.

4.3 Verschillen in dalingsbeeld ten opzichte van prognose 2012

Figuur 5 toont *prognose 2012* voor zichtjaar 2100 samen met de basisprognosekaart *prognose 2023* voor 2100. In deze paragraaf worden de overeenkomsten en verschillen besproken.



Figuur 5 Prognose 2023 (links) en prognose 2012 (rechts) voor zichtjaar 2100. Van de nieuwe prognose is de basisprognose weergegeven.

Zuidelijk Flevoland

Prognose 2012 (De Lange et al., 2012) voorspelde een forse bodemdaling in grote delen van Zuidelijk Flevoland, het sterkst direct ten noorden en ten oosten van Almere Buiten met daling voor de periode 2011-2100 van meer dan een meter. Volgens *prognose 2023* is de bodemdaling in dit gebied zeer onzeker maar ook geringer. De basisprognose toont daling tot enkele decimeters voor de periode 2020-2100; vrijwel geen compactie, lokaal een beperkte bijdrage van veenoxidatie en een zeer geringe bijdrage van (rest)rijping. 'Prognose hoog' laat echter zien dat daling van meer dan een halve meter op veel plaatsen niet kan worden uitgesloten door een grotere bijdrage van zowel oxidatie als (rest)rijping. Daling in de orde van een meter wordt echter nergens voorspeld voor het gebruikte scenario[8]. Andere scenario's waarin sprake is van grondwaterstandsdaling door sterk toenemende droogte of door actieve ingrepen zouden tot grotere bodemdaling kunnen leiden. Grote delen van Zuidelijk Flevoland zijn daar waarschijnlijk gevoelig voor. De dalingssnelheidskaart die is gemaakt met de hoogtebestanden van het AHN (Figuur 11) laat bijvoorbeeld zien dat er waarschijnlijk vrij veel maaivelddaling van één a twee decimeter heeft plaatsgevonden in het centrale deel van Zuidelijk Flevoland in de periode 2009-2020 voorafgaand aan de prognose - het landelijk gebied tussen de snelwegen A6, A27 in het noord- en zuidwesten en de Hoge Vaart en de Ooievaarstocht in het zuid- en noordoosten kleurt dominant blauw op de kaart. De grootste bijdrage aan die daling lijkt[9] te zijn opgetreden in de periode 2016-2020. Dit kan erop duiden dat de extreme droogte van 2018 tot extra bodemdaling heeft geleid in dit gebied en dat het gebied gevoelig is voor grondwaterstandsverlaging[10].

Oostelijk Flevoland

Met uitzondering van een zone langs het IJsselmeer vertonen de vorige en de nieuwe prognose grote overeenkomsten. De bodemdaling is over het algemeen gering. En beide prognoses bevatten een band met meer bodemdaling ten noordoosten van Dronten waar veen relatief dicht onder maaiveld voorkomt. Gebieden met sterke bodemdaling in *prognose 2012* direct ten noorden van Lelystad en ten westen van Swifterbant komen niet terug in *prognose 2023*, waarschijnlijk omdat de voorspelde bijdrage van compactie veel geringer is.

Noordoostpolder

Voor de Noordoostpolder is *prognose 2023* in grote lijnen goed vergelijkbaar met *prognose 2012* met zones met relatief grote daling nabij Schokland, ten zuiden van Tollebeek, ten noorden van Urk, ten noordwesten van Emmeloord en op de overgang naar het oude land rond Kuinre. *Prognose 2023* laat vooral zien dat hoeveelheid bodemdaling die voor deze gebieden wordt verwacht zowel aanzienlijk meer als aanzienlijk minder kan zijn dan in *prognose 2012*. Tussen Emmeloord en Marknesse wordt in *prognose 2023* wat meer bodemdaling verwacht.

---

[8] De grote(re) bodemdaling in de vorige prognose is waarschijnlijk vooral bepaald door de polderbrede kalibratie op basis van historische dalingstrends op voormalige rijpingsterreinen tot begin jaren '90 van de vorige eeuw (retrospectieve benadering). Ook waren rijping en compactie niet opgenomen als verschillende processen. Daardoor is waarschijnlijk een grote bijdrage in de prognose 'terecht gekomen' in compactie van diepere veen- en kleilagen wat in de prognose vooral tot uiting komt op locaties waar het Holocene pakket relatief dik is (rond Almere en ten noorden van Lelystad). De nieuwe prognose gaat uit van de 'actuele bodem- en grondwatercondities' en de processen die daaraan gekoppeld kunnen worden. Een grote bijdrage van compactie is niet aanwezig in het gekozen scenario omdat er niet of nauwelijks belasting van de diepere lagen plaatsvindt door verlaging van de grondwaterstand.

[9] De voorzichtigheid heeft te maken met de onzekerheid in de AHN hoogteschattingen (paragrafen 7.2.2 en 7.2.3)

[10] Voor 'prognose hoog' is weliswaar gerekend met een wat lagere grondwaterstand dan voor de basisprognose, maar er is geen scenario van grondwaterstandsverlaging toegepast.

4.4 Relevante aspecten voor kaartgebruik

Resolutie
De prognosekaarten hebben een ruimtelijke resolutie van 100 m x 100 m. Dat betekent dat de kaarten géén informatie leveren op een fijnere schaal. Elke getalswaarde moet worden beschouwd als een representatieve waarde voor een gebied van 100 m x 100 m.

Scenario
De bodemdalingsprognose is gekoppeld aan een set van uitgangspunten (basis scenario) zoals een vast peil, een gematigde klimaatontwikkeling en onveranderd landgebruik. De prognose is dus niet noodzakelijk een verwachting van de 'werkelijke ontwikkeling'. Deze kan en zal, met name op de langere termijn, op allerhande manieren lokaal of regionaal afwijken van het gekozen scenario. Wat de gevolgen zijn van andere uitgangspunten kan onderzocht worden door prognoses te maken voor aanvullende/andere scenario's, en deze te vergelijken met het basis scenario.

Onzekerheid/bandbreedte
De basisprognose kan beschouwd worden als de mediane waarde[11]. Dat wil zeggen, er is 50% kans dat de bodemdaling 'in werkelijkheid' hoger en 50% kans dat deze lager is. De mate waarin de bodemaling hoger kan zijn is vaak echter aanzienlijk groter dan dat deze lager kan zijn. De basisprognose ligt daardoor vaak dichter bij de lage prognose dan bij de hoge prognose, en is soms zelfs vrijwel gelijk aan de lage prognose. Verder moet er rekening mee worden gehouden dat de basisprognose de bodemdaling op de ene plaats kan onderschatten en op de andere plaats kan overschatten.
De kaarten 'prognose laag' en 'prognose hoog' geven een indicatie hoeveel hoger of lager de prognose kan zijn dan de basisprognose (voor het gehanteerde scenario). De kans dat de waarden daarbuiten vallen wordt klein geacht. Er kan daarvoor gedacht worden aan ca. 20%[11].
Het verschil tussen prognose laag en prognose hoog is op diverse plaatsen meer dan 30 cm in 2050 en in 2100 loopt dit in bodemdalingsgevoelige gebieden op tot meer dan een halve meter. Voor gebruik van de prognose in specifieke toepassingen is het daarom belangrijk om rekening te houden met de onzekerheid, en zijn verdere afwegingen en keuzes nodig. Bijvoorbeeld of kan worden volstaan met gebruik van de basisprognose, de hoge prognose, een onderbouwde aanpassing daarvan, of dat meerdere varianten moeten worden gebruikt. Deze afwegingen zijn toepassingsafhankelijk; er bestaat geen standaard instructie voor. Inzet van deskundigen van ZZL en/of PZL bij gebruik van de prognose is daarom belangrijk.
De onzekerheid in de bodemdaling komt voort uit onzekerheid over invoer/parameters in de onderliggende berekeningen. De onzekerheid van de prognose is alleen getoond voor de bodemdaling, maar de marge (of: bandbreedte) die daaruit volgt is ook van toepassing op de volgende kaarten:

- Maaiveldhoogte
- Drooglegging

Daarnaast is er onzekerheid in de initiële maaiveldhoogte. De onzekerheid in de verandering van de GLG (-mv) – deze verandering is niet expliciet getoond in de kaarten – wordt geschat op ca. 50% van de onzekerheid in de bodemdaling. De onzekerheid van de bodemdalingsbijdragen van de drie onderscheiden processen is niet goed apart te bepalen, maar per bijdrage maximaal gelijk aan de onzekerheid van de totale bodemdaling.

Negatieve drooglegging
Op enkele locaties laten de (basis)prognosekaarten van de drooglegging een ontwikkeling zien naar een negatieve drooglegging (o.a. bij Schokland); dat betekent dat het maaiveld

[11] Dit betreft een 'expert judgement' van de makers, het berust niet op een formele statistische analyse.

door de bodemdaling (gemiddeld) lager komt te liggen dan het oppervlaktewaterpeil. Deze situatie kan zich in beperkte mate voordoen in de praktijk – er zijn voorbeelden van in Zuid-Holland. Echter, in de praktijk wordt dan vaak ingegrepen in de waterhuishouding en/of het landgebruik (natuur, natte teelt of onderbemaling), zodat de situatie niet ontstaat. De bodemdalingsprognose betreft een scenario zonder ingrepen.

5 Mogelijkheden voor aanvulling en verbetering

Aanpassing voor het gekozen klimaatscenario

Prognose 2023 is gemaakt voor het KNMI'14 GL-scenario (Gematigde opwarming en een beperkte (Laag) vernatting/verdroging van het klimaat). In overleg is besloten om alleen de invloed van de opwarming op de snelheid van veenoxidatie in rekening te brengen en de invloed van het klimaatscenario op de grondwaterstand (GLG) vooralsnog buiten beschouwing te laten gezien de benodigde inspanning, de verwachtte geringe invloed daarvan, en het feit dat de KNMI'14 scenario's spoedig verouderd zouden zijn. Oktober 2023 zijn de nieuwe klimaatscenario's van het KNMI gepubliceerd. Dit biedt de mogelijkheid om op een later moment de prognose te actualiseren voor het corresponderende KNMI'23 GL-scenario en daarin de invloed op de GLG mee te nemen. Voor het bepalen van de GLG verandering voor het klimaatscenario moeten dan nieuwe berekeningen worden gedaan met het landelijk hydrologisch model (LHM).

Mogelijkheid toevoegen aanvullende scenario's

De nieuwe prognosekaarten voor Flevoland zijn geproduceerd met Atlantis, de open source productieomgeving waarmee Deltares in samenwerking met TNO en WENR bodemdalingsvoorspellingen maakt op basis van een 3D ondergrondmodel (voxelmodel). De inspanning daarvoor in dit project was relatief groot omdat hiervoor rekenwijzen en input datasets moesten worden ontwikkeld die zijn afgestemd op de specifieke omstandigheden in Flevoland. Nu deze basis is gelegd, kunnen efficiënt aanvullende scenario-berekeningen worden gedaan die de invloed in beeld brengen van veranderingen in (grond)waterpeilbeheer en andere KNMI-klimaatscenario's. Daarnaast kan Atlantis worden gebruikt om efficiënt inzicht te krijgen in de ruimtelijke verschillen in zettingsgevoeligheid van de ondergrond voor ophogingen die worden toegepast voor grote nieuwbouwprojecten.

Wat is nodig om de nauwkeurigheid van de basisprognose te vergroten en de onzekerheid of bandbreedte te verkleinen?

De uitgevoerde studie laat zien dat de onzekerheid van de prognose in grote delen van de provincie groot is. Dit weerspiegelt beperkingen in de kennis van zowel ondergrondcondities als van de onderliggende bodemdalingsprocessen. Zo is er nauwelijks zicht op hoeveel maaivelddaling er in recente jaren plaatsvindt[12]. En feitelijke informatie over welke deelprocessen (rijping, oxidatie, compactie) verantwoordelijk zijn voor die maaivelddaling ontbreekt volledig. De prognose is dus eigenlijk een zo goed mogelijke schatting op basis van algemene kennis over de processen en informatie over de ondergrond van Flevoland (via '*een geformaliseerd expert judgement systeem'*).

De prognose kan dus vooral worden verbeterd, en de onzekerheid verkleind, door meer kennis te verkrijgen over de 'actuele' bodemdaling in Flevoland en de bijdragen daarin van de verschillende processen. Daarnaast helpt het om de ondergrondcondities – met name de grondwaterstand en bodemopbouw – (nog) nauwkeuriger in beeld te krijgen. Al deze aspecten kunnen bijdragen aan zowel verbetering van de nauwkeurigheid van de basisprognose als aan verkleining van de onzekerheid/bandbreedte. Het volgende wordt daarom aanbevolen:

[12] De uitgevoerde bepaling met AHN data laat zien waar de maaivelddaling de afgelopen tien jaar mogelijk vrij groot was (Figuur 11 en Figuur 12), maar de onzekerheid in de daling is net zo groot of groter dan de 'meetwaarden' zelf.

1. Het wordt aanbevolen om bodemdalingsmeetsites te realiseren die zijn uitgerust met een extensometer met meerdere bodem-ankers en een fundering in de Pleistocene ondergrond. Zulke meetsites registreren niet alleen de maaivelddaling (met mm precisie), maar registreren ook bijdragen daarin van verschillende bodemlagen. Op deze wijze kan worden vastgesteld welke bijdrage er feitelijk is van het minerale dek (krimp), van veen dat zich boven de 'grondwaterstand' bevindt (aerobe oxidatie), en van diepere klei en veenlagen (compactie en mogelijk anaerobe oxidatie). Deze meetsites tonen ook wat de invloed is van individuele droge zomers en welke grondwater- en bodemvochtcondities de bodemdaling bepalen. Met deze nauwkeurige informatie over wat zich daadwerkelijk afspeelt in de bodem, mede in relatie met de grondwaterstanden en bodemvocht, kunnen diverse onzekerheden in de prognoseberekeningen worden verkleind.

2. Het wordt aanbevolen om door een geodetisch kennisinstituut te laten onderzoeken of nauwkeurigere gebiedsdekkende maaivelddalingsbepalingen voor het landelijk gebied in Flevoland mogelijk zijn door combinatie van verschillende geodetische datasets (bijvoorbeeld door reductie van de systematische fout in AHN datasets met nauwkeurige waterpassingen van onderheide objecten).

3. Het wordt aanbevolen onderzoek te doen naar de afbraakgevoeligheid (basisrespiratie) van de verschillende typen veen in Flevoland en van de organische stofdichtheid van het veen. Onzekerheid hierover levert een belangrijke bijdrage aan de onzekerheid van de prognose.

4. Er zijn gebiedsdelen waar de basisprognose forse bodemdaling voorspelt (met name door veenoxidatie), maar waar dat niet direct wordt verwacht op basis van de (recente) ontwikkelingen in het gebied. Een voorbeeld is een gebied ten noordwesten van Emmeloord. Ondanks het dunne minerale dek bevatten boorbeschrijvingen zeer weinig aanwijzingen voor het optreden van veenoxidatie (aanwezigheid veraard veen). Het wordt geadviseerd om een gerichte veldstudie te doen om de situatie in deze gebieden nader te duiden. Dit kan belangrijke inzichten opleveren waarmee de rekenwijzen mogelijk kunnen worden verbeterd/verfijnd.

5. De huidige studie gaf aanwijzingen dat de mate van rijping die op dit moment wordt aangetroffen in Flevoland mede wordt bepaald door kleitype. Het wordt geadviseerd hier nader onderzoek naar te doen. Indien kleitype van invloed is, kan dit worden gebruikt om de modellering/parametrisatie van het rijpingsgetal in het ondergrondmodel van de prognose te verbeteren.

6. Wanneer de tijdreeksen van nog onbenutte grondwatermeetpunten van de provincie voldoende lang zijn, en deze op geschikte locaties staan, verdient het aanbeveling om deze meetpunten mee te nemen in updates van de GLG kaart van Flevoland.

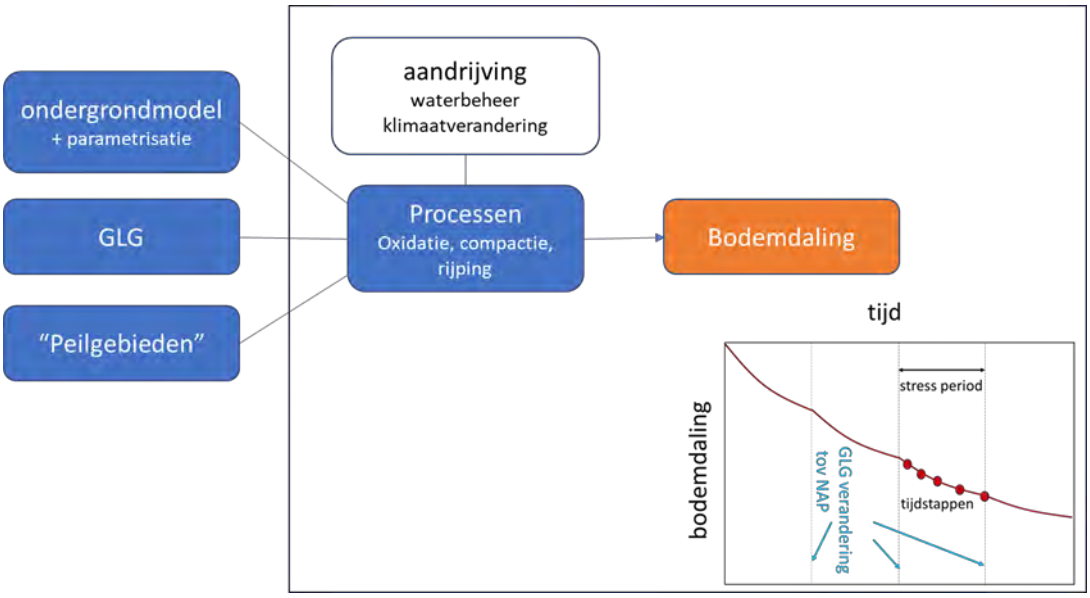
7. De bodemdaling kan sterk beïnvloed worden door het landgebruik. Zo kan bodemverdichting (door zware machines) er voor zorgen dat diepe scheuren worden samengedrukt. Verder kan door diepe grondbewerking de rijping van kleilagen versnellen en kunnen diepere veenlagen naar boven worden gebracht waardoor deze versneld oxideren (Kooi et al, 2022). Het wordt geadviseerd de mogelijke invloed van het landgebruik te onderzoeken met behulp van de aanvullende scenario-berekeningen.

II: Technische toelichting

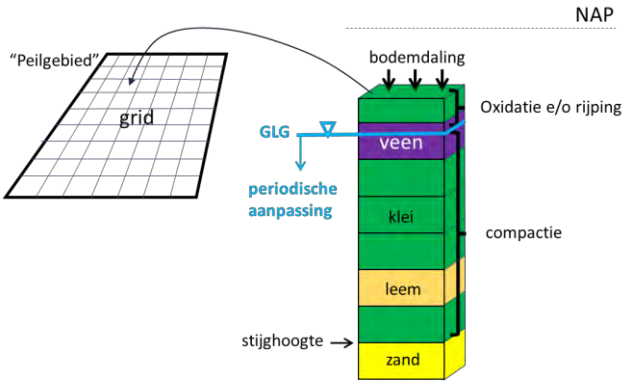
6 Kaartproductieomgeving Atlantis

De berekeningen en kaartproductie zijn gedaan in de productieomgeving Atlantis. De nationale bodemdalingsvoorspellingskaarten worden sinds 2017 vervaardigd in Atlantis (Bootsma e.a. 2020; Erkens e.a. 2021). Atlantis is een open source productieomgeving waarmee Deltares in samenwerking met TNO en WENR bodemdalingsvoorspellingen maakt op basis van een 3D ondergrondmodel (voxelmodel). Door bij Atlantis aan te sluiten kunnen nieuwe prognoses of aanvullende scenario's in de toekomst sneller en makkelijker worden gemaakt, en geïntegreerd in de landelijke kaarten. Bovendien wordt de productieomgeving Atlantis doorontwikkeld met eigen financiering vanuit de onderzoeksinstituten. In dit hoofdstuk wordt algemene systematiek van Atlantis toegelicht.

Het startpunt voor de berekeningen bestaat uit de drie elementen die links zijn weergegeven in Figuur 6: een geparametriseerd ondergrondmodel, een kaartbeeld van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) en een onderverdeling van het gebied in "peilgebieden". Het ondergrondmodel is opgebouwd uit 3D volume-elementen (voxels). Het voxelmodel is gestructureerd in (aaneengesloten) bodemkolommen (voxel stacks) (Figuur 7). Elke voxel wordt gekarakteriseerd met een grondsoort (lithoklasse) en aanvullende parameterwaarden. Het NAP wordt gebruikt als hoogtereferentie. De verticale positie van bodemkolommen varieert dus ruimtelijk met de maaiveldhoogte. Ook de GLG wordt gemodelleerd als peil (t.o.v. NAP) (Figuur 7).
Bodemdaling wordt vervolgens berekend per bodemkolom. Bodemdaling komt tot stand door volumeverlies van voxels. De basis van de bodemkolommen houdt een vast niveau ten opzichte van NAP. Het volumeverlies met de tijd wordt berekend voor verschillende 'bodemdalingsprocessen' – voor Flevoland zijn dat oxidatie, compactie en rijping (Figuur 6 en Figuur 7). De positie van de GLG ten opzichte van de voxels (en verandering van die positie) is sterk bepalend voor deze processen.



Figuur 6 "Workflow" op hoofdlijnen in Atlantis.



Figuur 7 Toepassing op bodemkolommen binnen een 3D voxel model van de ondergrond.

De berekeningen zijn onderverdeeld in ‘stress periods’ en tijdstappen. Dit is rechtsonder in Figuur 6 weergegeven. Deze berekeningen vinden plaats binnen het witte kader in Figuur 6. Binnen een stress period heeft de GLG een vast peil. Door bodemdaling treedt dus daling op van voxels ten opzichte van de GLG (‘verdrinking’). Dit remt de bodemdalingsprocessen. Op de overgang naar een volgende stress period kan het GLG peil worden gewijzigd. Over het algemeen betreft dit GLG verlaging. Dit is in Figuur 6 weergegeven met het blok ‘aandrijving’. Hierin kunnen o.a. scenario’s voor de invloed van waterbeheer en klimaatverandering op de GLG worden gemodelleerd. Zo kan GLG peilverlaging bijvoorbeeld worden gekoppeld aan een scenario voor oppervlaktewaterpeilverlaging[13]. Ook kan de GLG geheel of gedeeltelijk worden “geïndexeerd” voor de bodemdaling in de voorgaande stress periode. Peilverlaging of GLG-indexactie voor bodemdaling kan worden gekoppeld aan “peilgebieden” (links in Figuur 6). Het GLG-peil kan ook worden aangepast volgens een gespecificeerde andere trend, bijvoorbeeld om de invloed van een klimaatontwikkeling te simuleren. Al deze invloeden kunnen worden gecombineerd. In Atlantis wordt de GLG om diverse redenen niet direct berekend via een grondwatermodel.

[13] Oppervlaktewaterpeil zelf is echter niet expliciet aanwezig in Atlantis.

7 AHN analyse

Dit hoofdstuk beschrijft de werkzaamheden en resultaten binnen het onderdeel ‘bodemdalingsmetingen’ (Figuur 1). ‘Bodemdalingsmetingen’ staat hier tussen aanhalingstekens omdat het feitelijk gaat om verwerking van hoogtedata uit het Actueel hoogtebestand Nederland (AHN). Deze hoogtedata zijn en worden niet verkregen voor bodemdalingstoepassingen. Daadwerkelijke (geodetische) bodemdalingsmetingen richten zich formeel op metingen van hoogte*verandering*, wat meer omvat dan individuele hoogtemetingen. Bij gebrek aan bodemdalingsmetingen worden de hoogtemetingen van het AHN hier wel benut om informatie uit af te leiden over hoogteverandering.

De analyse bestaat uit twee onderdelen. In het eerste onderdeel zijn hoogteschattingen voor AHN3 en AHN4 toegevoegd aan bestaande datasets van ZZL voor de rijpingsterreinen in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland. In het tweede onderdeel is een provincie dekkende kaart gemaakt van de ‘recente bodemdalingssnelheid’ (2009-2022) op basis van AHN2, AHN3 en AHN4.

7.1 Aangevulde tijdreeksen maaivelddaling rijpingsterreinen

De datasets en de grafieken die met de Bodemdalingskaart Flevoland (De Lange e.a., 2012) zijn opgeleverd zijn uitgebreid met de maaivelddalingsschattingen voor edities 3 & 4 van het AHN. AHN3 en AHN4 zijn zowel in Oostelijk als in Zuidelijke Flevoland respectievelijk ingewonnen in de jaren 2016 en 2020.

7.1.1 Methode

Om een consistente dataset te behouden is de oorspronkelijke werkwijze uit 2012 toegepast:

- Gebruik van de 5m resolutie rasterkaarten AHN.

Per rijpingsterrein (oppervlak ca. 50 m x 60 m):

- Selectie van alle cellen waarvan het middelpunt zich in de polygoon van het rijpingsterrein bevindt.
- Bepaling van de gemiddelde, minimale en maximale NAP hoogte alsmede variantie en standaarddeviatie van de NAP hoogte.
- Bepaling van de daling voor de gemiddelde, minimale en maximale NAP hoogte ten opzichte van de start NAP hoogte zoals vermeld in de oorspronkelijke dataset (2012).

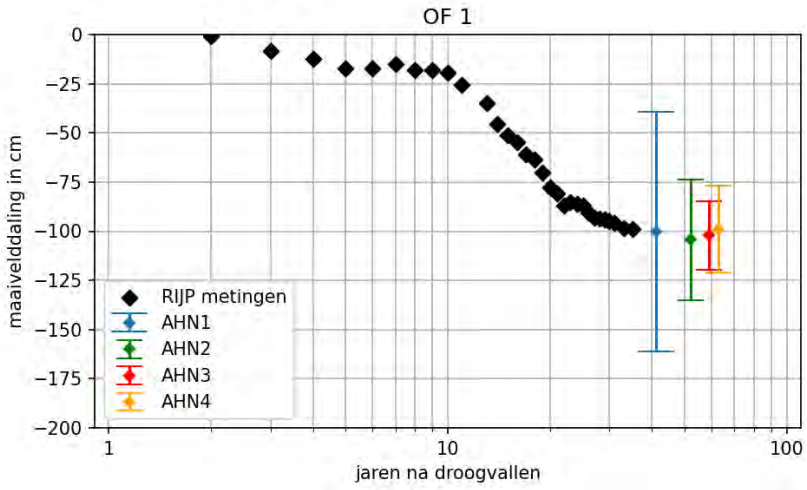
Voor een aantal rijpingsterreinen is de werkwijze ook toegepast op AHN2 en zijn resultaten vergeleken met de reeds bestaande waarden in de dataset. Daaruit bleek dat de verschillen verwaarloosbaar zijn (kleiner dan 1 mm).

7.1.2 Resultaten

De resultaten zijn opgenomen in digitale bijlage 19A.2. Figuur 8 toont als voorbeeld de grafiek voor rijpingsterrein OF 1. De datapunten van de RIJP metingen en AHN1 en AHN2 zijn overgenomen uit de oorspronkelijke dataset. De datapunten voor AHN3 en AHN4 zijn de nieuwe toevoegingen. Het symbool voor de AHN datapunten correspondeert met de gemiddelde hoogte van het rijpingsterrein.

Belangrijk: De bandbreedte die is aangegeven voor elk van de AHN dalingsschattingen is géén maat voor de onzekerheid in de daling. De bandbreedte correspondeert met het bereik van de hoogte binnen het rijpingsterrein (minimale en maximale waarde). De onzekerheid van de daling wordt bepaald door de onzekerheid/fout in de AHN hoogte. Voor agrarisch land

is die onzekerheid relatief groot ten opzichte van nauwkeurig definieerbare oppervlak zoals wegdek (maaiveldhoogte van bouwland heeft een lage idealisatie precisie). Voor agrarisch land en met name bouwland moet gedacht worden aan een standaardafwijking van de hoogte van 1 a 2 decimeter (vakgroep Geoscience and Remote Sensing TUD, pers. comm.).



Figuur 8 Grafische weergave van het resultaat voor rijpingsterrein OF 1. "RIJP metingen" zijn gebaseerd op Flevobericht 388. De bandbreedte aangeven bij de AHN dalingsschattingen zijn o.b.v. de minimale en maximale hoogtewaarden (5 m x 5 m) binnen het rijpingsterrein.

Er is geen uitgebreide studie gedaan naar wat de trends in de data aan informatie verschaffen. De tijdreeksen voor diverse terreinen wekken de indruk dat de daling tussen 2016 en 2020 wat sterker was dan in de jaren daarvoor (OF6, OF17, OF14, ZF18, ZF19, ZF29, ZF34), wat zou kunnen wijzen op een invloed van de recente droge zomers, maar dat kan niet met zekerheid worden vastgesteld gezien de mogelijke fout in de individuele hoogteschattingen. Op diverse plaatsen lijken ook recente ophogingen het dalingsbeeld te verstoren zoals nabij Zeewolde (ZF10) en Almere (ZF26). Een opvallende grote dalingsversnelling lijkt te hebben plaatsgevonden in het noordoostelijk deel van de Oostvaardersplassen (ZF33). Mogelijk hangt dit samen met (tijdelijke) verlaging van het waterpeil om rietgroei te beperken.

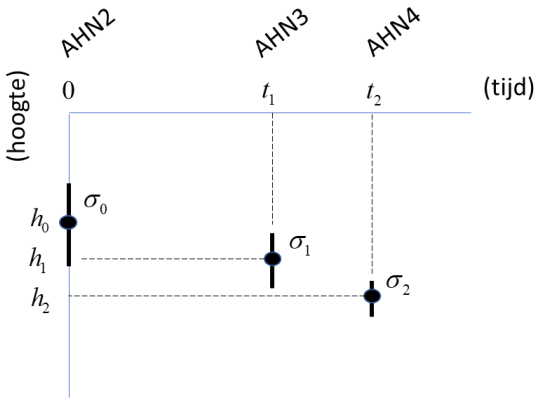
7.2 Maaiveldalingssnelheidskaart op basis van AHN2,3,4

7.2.1 Methode

Voor de productie van de snelheidskaart is gebruik gemaakt van de 5 m rasters van ANH2 (2009), AHN3 (2016) en AHN4 (ZF en OF: 2020; NOP: 2022). De totale periode is dus 11 tot 13 jaar. Voor elk rasterpunt levert dat hoogteschattingen voor drie verschillende jaren (Figuur 9). Per rasterpunt is vervolgens een lineaire regressie uitgevoerd om de lineaire snelheid van maaiveldhoogteverandering én de fout daarin te schatten (Figuur 10). De foutschatting is essentieel om de kaartinformatie te kunnen gebruiken (significantie). Met advisering door de vakgroep Geosciences and Remote Sensing van de TU Delft is de onderstaande rekenwijze opgesteld en gebruikt.

Box 2: Rekenwijze voor de productie van de snelheidskaart

De notatie van de parameters voor de 'meetdata' voor elk gridpunt in kaartbeeld is weergegeven in Figuur 9. Aan elke AHN hoogte is een standaarddeviatie σ toegekend.

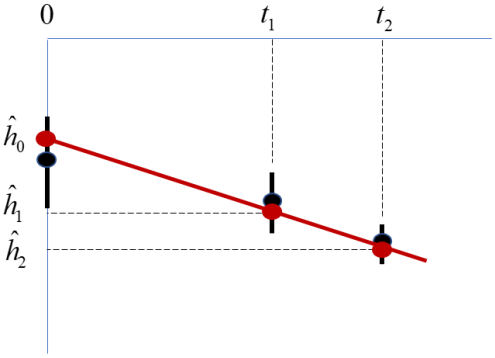


Figuur 9 Gebruikte notaties voor de AHN hoogte (h), standaarddeviatie van de hoogte (s) en tijd (t). Tijd is de tijd sinds de AHN2 opname (2009).

Voor de schatting van de lineaire snelheid wordt een ‘simpele’ kleinste-kwadraten methode gebruikt (regressie). De standaarddeviaties worden meegenomen in een covariantiematrix.

Het lineaire model, weergegeven me de rode lijn in Figuur 10, is:

$$\hat{h}_0 = \hat{h}_0$$
$$\hat{h}_1 = \hat{h}_0 + vt_1$$
$$\hat{h}_2 = \hat{h}_0 + vt_2$$



Figuur 10 Notatie van de hoogten voor het lineaire model (rode lijn) dat wordt gefit aan de meetdata.

In matrixvorm wordt het model geschreven als

$$\hat{h} = A\hat{x}$$

$$\hat{h} = \begin{pmatrix} \hat{h}_0 \\ \hat{h}_1 \\ \hat{h}_2 \end{pmatrix} \qquad A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ t_1 & 1 \\ t_2 & 1 \end{pmatrix} \qquad \hat{x} = \begin{pmatrix} v \\ \hat{h}_0 \end{pmatrix}$$

In deze notatie worden de meetdata (de drie ANH hoogtes) geschreven als

$$h = \begin{pmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \end{pmatrix}$$

De covariantiematrix bij de meetdata:

$$Q_h = \begin{pmatrix} \sigma_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_2^2 \end{pmatrix}$$

De kleinste-kwadraten methode levert als oplossing:

$$\hat{x} = Q_x A^T Q_h^{inv} h$$

$$Q_x = \left[A^T Q_h^{inv} A \right]^{inv}$$

De gezochte dalingssnelheid v is de eerste component in de oplossingsvector $\hat{x}$.
De gezochte standaardafwijking van v is de tweede-machtswortel van de eerste component van de variantiematrix van de oplossing Q_x.

De matrixvergelijkingen zijn opgenomen en toegepast in een Python script. De methode is daarmee in de toekomst makkelijk is uit te breiden met extra metingen, bijvoorbeeld AHN5.

7.2.2 Resultaat

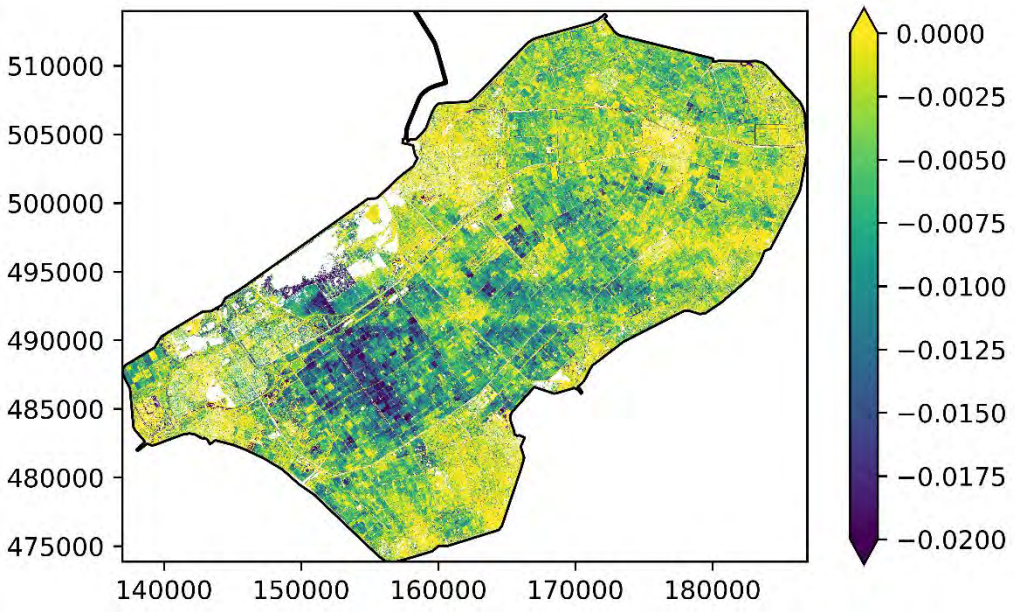
Figuur 11 en Figuur 12 tonen het snelheidsbeeld voor respectievelijk Oostelijk en Zuidelijk Flevoland en voor de Noordoostpolder in m/jaar. Digitale versies van de kaarten zijn beschikbaar als digitale bijlage 19A.4. De 1xσ fout in de snelheid bedraagt ten minste 0,01 m/jaar (werkwaarde 0,015 m/jaar). Dit wordt toegelicht in Box 3.

Box 3: Foutschatting voor de snelheidskaart

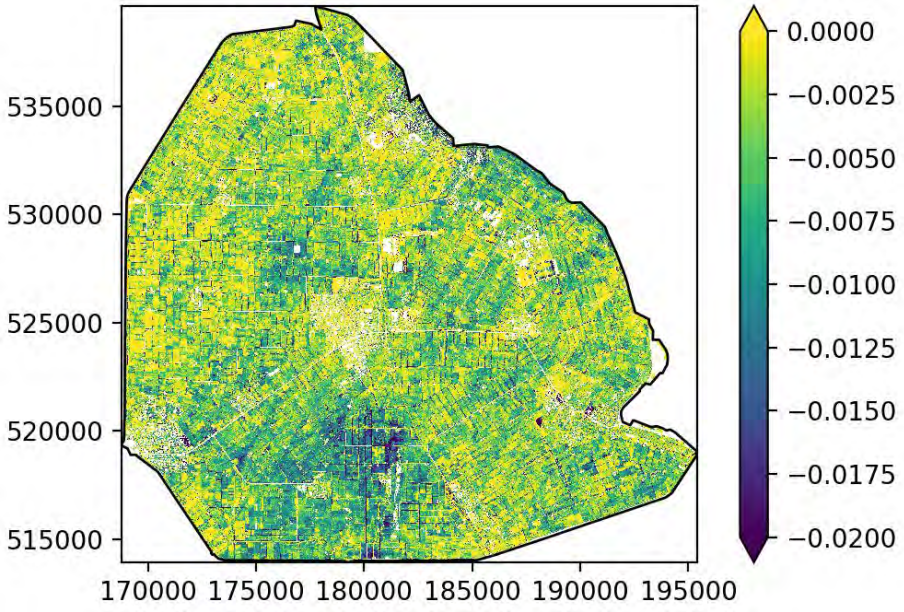
De 1xσ (standaarddeviatie) van de snelheid volgt uit de standaarddeviaties van de drie hoogtewaarden van AHN2, AHN3 en AHN4. AHN vermeldt een maximale systematische fout van 5 cm en een maximale stochastische fout van 5 cm voor deze hoogtedata. Als werkgetal voor de standaarddeviatie zou dan een waarde tussen 5 en 10 cm voor de ANH hoogten passend zijn voor de berekening van standaarddeviatie van de snelheid. Deze hoogtefouten zijn echter geschat op basis van validatietests voor vrij ideale oppervlakken zoals parkeerplaatsen of wegdek. Er moet vanuit worden gegaan dat de fout voor veel minder ideale oppervlakken zoals akkerland aanzienlijk groter is (geringere idealisatieprecisie). Tabel 3 toont de standaarddeviatie van de snelheid voor vier waarden voor de standaarddeviatie van de hoogte. De standaarddeviatie van de snelheid is dus behoorlijk onzeker, maar groter dan 0,01 m/jaar. Als werkwaarde voor duiding van de kaarten wordt 0,015 m/jaar voorgesteld

Tabel 3 Fout in de snelheid als functie van de fout in de hoogte

Standaarddeviatie hoogte	Standaarddeviatie bodemdalingssnelheid
7,5 cm	1,0 cm/jaar
10 cm	1,4 cm/jaar
15 cm	2,1 cm/jaar
20 cm	2,8 cm/jaar



Figuur 11 Lineaire maaiveldsnelheid (m/jaar) op basis van AHN2, AHN3 en AHN4 voor Zuidelijk en Oostelijk Flevoland (beperkte resolutie weergave). Negatieve waarden betreffen maaivelddaling. Positieve waarden (stijging) zijn weergegeven als geen bodemdaling (geel) om dalingsschattingen duidelijk in beeld te krijgen. De 1xσ fout in de kaartwaarden wordt geschat op 0,015 m/jaar.



Figuur 12 Lineaire maaiveldsnelheid (m/jaar) op basis van AHN2, AHN3 en AHN4 voor de Noordoostpolder (beperkte resolutie weergave). Negatieve waarden betreffen maaivelddaling. Positieve waarden (stijging) zijn weergegeven als geen bodemdaling (geel) om dalingsschattingen duidelijk in beeld te krijgen. De 1xσ fout in de kaartwaarden wordt geschat op 0,015 m/jaar.

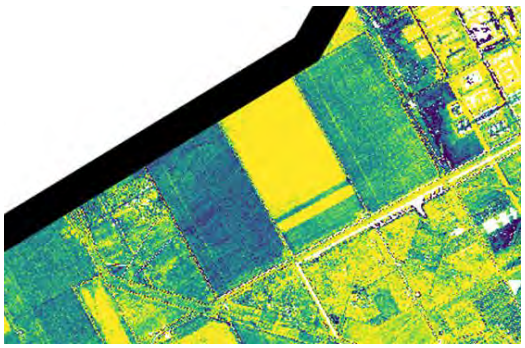
7.2.3 Duiding

- Alleen waar v > 0,015 m/jaar (donkerblauw) is kan met vrij grote waarschijnlijkheid (kans ca. 83%) worden vastgesteld dat er sprake is van bodemdaling. Dit geldt dus slechts voor

een beperkt deel van het totale areaal. Tegelijkertijd is er overal 50% kans dat de bodemdalingssnelheid groter is (of de bodemstijging minder is) dan de kaartwaarden.

- Donkerblauwe tinten signaleren gebiedsdelen met relatief sterke bodemdaling van meer dan 0,01 m/jaar voor de meetperiode. Deze gebieden komen voor in het centrale deel van ZF en aan de zuidzijde van de Oostvaardersplassen. In de NOP komen deze gebieden voor ten NW van Schokland en, iets minder overtuigend, ten NW van Emmeloord.

- De snelheidswaarden in agrarisch gebied worden sterk bepaald door landbewerking (ploegen) en/of veranderingen in landbedekking (gewas). Dat kan worden opgemaakt uit het feit dat snelheden sterk kunnen verschillen tussen naast elkaar gelegen landbouwpercelen. Of er wel/niet geploegd is kort voor de AHN opname of er bij één of twee opnamen een gewas heeft gestaan kan veel uitmaken in de verkregen AHN hoogte. Deze 'toevallige' hoogtevariaties maken geen onderdeel uit van de 'gezochte' bodemdalingstrend door rijping, oxidatie en compactie en beperken daarmee de informatiewaarde voor de bodemdalingsprognose. Daarnaast wordt verwacht dat krimp-zwel bewegingen zorgen voor variatie in maaiveldhoogte gedurende het jaar. Zwel en bodemstijging ontstaat wanneer uitgedroogde klei weer vocht opneemt. Deze variaties zijn naar verwachting echter klein in vergelijking met invloeden van landbewerking zoals door ploegen.



In stedelijk gebied zijn invloeden van ophoging (drukt maaivelddalingssnelheid of levert maaiveldstijging, ook bij sterke bodemdaling), of verwijdering van voorbelastingen (snelle maaivelddaling niet representatief voor bodemdaling) aanwezig.

- In de NOP zijn de tochten veelal duidelijk herkenbaar door de (donker)blauwe tinten. Dit wordt geïnterpreteerd als een artefact in de hoogte informatie en snelheidsschatting zonder betekenis voor bodemdaling.

- De kaarten bevatten vanzelfsprekend geen informatie over de diepte-intervallen in de ondergrond die bijdragen aan de bodemdaling.

8 Ondergrondmodel

8.1 Inleiding

Het ondergrondmodel is een voxelmodel, d.w.z., een ruimtelijk model dat is opgebouwd uit horizontale lagen die elk bestaan uit aaneengesloten identieke blokken. Elke laag heeft een dikte van 0,2 m, elk blok meet 100 m bij 100 m in het horizontale vlak en is 0,2 m dik. De basis voor het voxelmodel is het ondergrondmodel van TNO (Gunnink, 2021). De bovenste 1,6 m van dit model is geactualiseerd op basis van recente bodemgegevens van WENR, beschikbaar via de BRO.
In dit hoofdstuk wordt eerst het diepere deel van het voxelmodel beschreven (paragraaf 8.2), vervolgens wordt toegelicht hoe het bovenste deel van het voxelmodel, d.w.z. het bodemdeel, tot stand is gekomen (paragraaf 8.3). Vervolgens wordt beschreven hoe de NAP hoogten zijn toegekend aan het voxelmodel (paragraaf 8.4).

8.2 Productiewijze ‘diepe deel’

Voor de diepere ondergrond (vanaf 1,60 m diepte) is gebruik gemaakt van een bestaand voxelmodel van de ondergrond. Dit model is in 2021 gemaakt t.b.v. een studie van de hydraulische weerstand van de deklaag in de Flevopolders (Gunnink, 2021). Voor een gedetailleerde beschrijving van de werkwijze wordt verwezen naar bovengenoemd rapport. Hieronder volgt een beknopte beschrijving.

Het voxelmodel van de ondergrond is gebaseerd op boringen die in de DINO database en BRO database zijn opgenomen, stand van zaken maart 2021. Dit zijn voor een deel zgn. RIJP boringen, die zijn gezet t.b.v. onderzoek naar de bodemgesteldheid na inpoldering. Boringen van Alterra zijn tevens gebruikt en ruim 4200 sonderingen. De sonderingen zijn bewerkt om tot een inschatting van de lithoklasse te komen. Ook zijn alle andere gegevens bewerkt om een eenduidige lithoklasse uit de boorbeschrijving te extraheren. Omdat het model is gemaakt voor de berekening van de deklaagweerstand zijn de verschillende zandklassen niet onderscheiden, omdat is aangenomen dat deze een dusdanig hoge verticale doorlatendheid hebben dat deze niet van belang zijn in het bepalen van de deklaagweerstand. De lithoklassen die zijn onderscheiden zijn veen, klei, zandige klei en zand (ongedifferentieerd).

Het voxelmodel is mede gebaseerd op een lagenmodel van de lithostratigrafische eenheden in het gebied. De basis van het model is de top van het Pleistocene zand. Vervolgens komt de Formatie van Nieuwkoop, Basisveenlaag (soms verslagen) voor en daarop de Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Wormer. Daarop is het Hollandveen Laagpakket van de Formatie van Nieuwkoop gevormd en daarna het laagpakket van Walcheren (Formatie van Naaldwijk). Tevens is de Almere Laag (Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren) gemodelleerd. De basis van iedere eenheid is in de boringen aangegeven en vervolgens is een vlak dekkend model van de basis van de eenheid berekend. De verschillende lagen zijn vervolgens “op elkaar gestapeld”, waardoor een consistent lagenmodel ontstaat.
Binnen iedere laag zijn de voxels geselecteerd die in die laag vallen en is een schatting berekend van de kans op iedere lithoklasse d.m.v. 3D kriging interpolatie van de boorgegevens. De kansen op iedere lithoklasse in elke voxel is bewerkt om tot een meest waarschijnlijke lithoklasse te komen volgens het algoritme dat is beschreven in Soares (1992). De meest waarschijnlijke lithoklasse is gebruikt voor het Atlantis model. Verder zijn in het voxelmodel voor Atlantis de voxeldikten verlaagd naar 0,2 m.

De boringen die gebruikt zijn in de modellering zijn deels van vlak na de inpoldering. Lagen in de boringen zijn zeer waarschijnlijk gecompacteerd en veen is geoxideerd. Daardoor is de toenmalige beschrijving niet een accurate beschrijving van de huidige situatie van de bodemopbouw. In het voxelmodel dat in 2021 gemaakt is voor de deklaagweerstand is hiermee geen rekening gehouden. Het ondiepe deel van het model tot 1,6m diepte is daarom vernieuwd, gebaseerd op meer recente boringen. De verwachting is dat de lagen dieper dan 1,60 m niet in sterke mate gecompacteerd zijn en dat het model dieper dan 1,60 m een voldoende accurate weergave van de huidige opbouw geeft.

8.3 Productiewijze bodemdeel

De gebruikte bodemgegevens zijn verzameld in de periode 2012 tot en met 2018. Ze zijn dus van recente datum. Voor processen als rijping en veenoxidatie is dat essentieel anders representeren ze niet de huidige situatie. De bodemgegevens bestaan uit 1461 profielbeschrijvingen die verricht zijn door ervaren veldbodemkundigen. Voor meer informatie over het bodemkundig onderzoek dat tot deze dataset heeft geleid wordt verwezen naar Brouwer et al. (2018). De bodemprofielen maken deel uit van de Basisregistratie Ondergrond (broloket.nl).

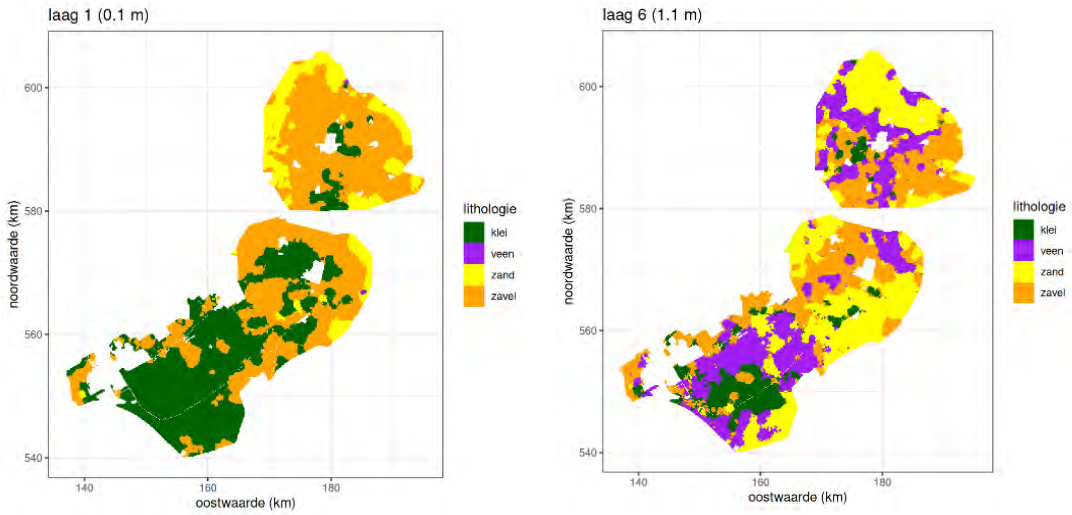
De bodemprofielen worden opgedeeld in acht laagjes van 0,20 m dikte. Het bovenste laagje begint aan maaiveld, het onderste laagje eindigt op een diepte van 1,6 m. Van elk laagje is de lithoklasse bepaald, d.w.z., of het gaat om klei, veen, zand of zavel. Deze classificatie is uitgevoerd conform de richtlijnen in ten Cate et al. (1995). Van elk laagje is tevens de rijpingsklasse bekend, die varieert van 1 (ongerijpt) tot 5 (volledig gerijpt). Veen en zand hebben rijpingsklasse “0”, een code die aangeeft dat rijping niet van toepassing is. Andere bodemprofielkenmerken zijn: het gehalte aan organische stof (uitgedrukt als massapercentage), het lutumgehalte (uitgedrukt als massapercentage), en indien veen aanwezig is, de veensoort.

Vervolgens worden deze bodemprofielen gebruikt om de bovenste 1,6 m van het voxelmodel te vullen. Hiervoor hebben we gebruik gemaakt van een geostatistische methode die bekend staat als Bayesian Maximum Entropy (BME). BME berekent voor elke voxel de kans op een bepaalde bodemeigenschap gegeven de waargenomen bodemeigenschappen in de omliggende bodemprofielen.

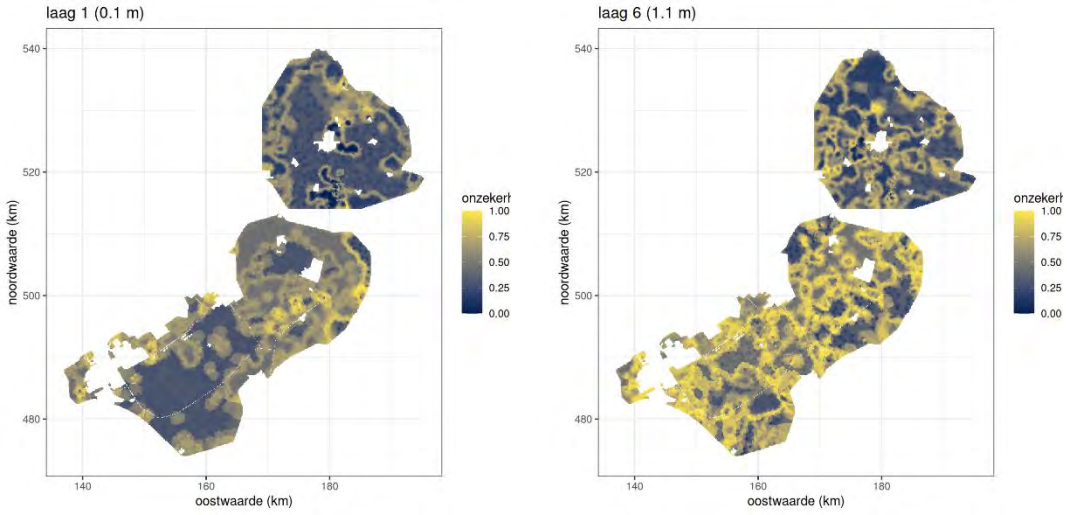
BME kan zowel gebruikt worden voor nominale variabelen, zoals lithoklassen, als continue variabelen, zoals het massapercentage lutum en het massapercentage organische stof. Deze methode biedt voordelen t.o.v. alternatieve ruimtelijke interpolatiemethoden. Er is bijvoorbeeld geen nabewerking nodig om valide kansen te krijgen. Voor alternatieve methoden, zoals indicator kriging (Journel, 1983), zijn dergelijke nabewerkingen vaak wel nodig. Daarnaast stelt BME minder restricties aan de modellen die bij het interpoleren mogen worden gebruikt en biedt het mogelijkheden om aanvullende informatie (zoals fysische principes) in te brengen. Nadeel van BME is dat de rekentijden aanzienlijk kunnen zijn. Voor meer informatie over BME zie Christakos (2000) en Bogaert (2002).

BME resulteert in een kansverdeling voor elk attribuut. Voor nominale variabelen zoals de lithoklassen zijn dit discrete verdelingen, d.w.z., de kans op het voorkomen van elke lithoklasse. We kiezen dan de lithoklasse met de grootste kans op voorkomen. Omdat we beschikken over de kansverdeling, kunnen we ook uitspraken doen over de nauwkeurigheid van de interpolatie. Voor continue variabelen zoals het massapercentage organische stof en lutum kiezen we voor de gemiddelde waarde volgens de kansverdeling.

Figuur 13 geeft de geïnterpoleerde lithoklasse voor laag 1 en laag 6. Voor de overige lagen wordt verwezen naar de bijlage 19E. Figuur 14 geeft de bijbehorende onzekerheid van deze kaarten. We zien dat we het meest onzeker zijn bij overgangen in lithologie.



Figuur 13 De geïnterpoleerde lithoklasse voor laag 1 (links) en laag 6 (rechts) van het voxelmodel.



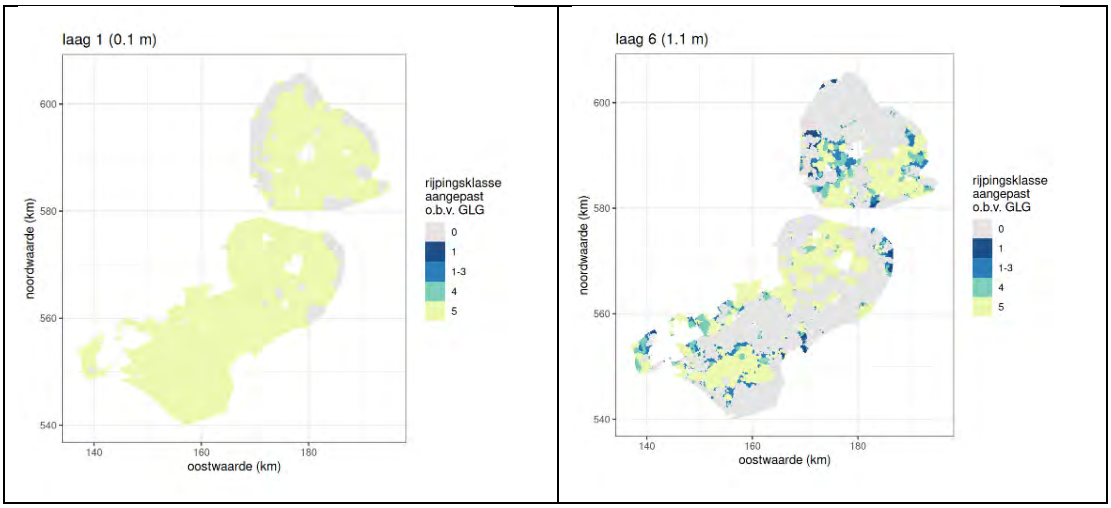
Figuur 14 Onze onzekerheid over de geïnterpoleerde lithoklasse voor laag 1 (links) en laag 6 (rechts) van het voxelmodel. De onzekerheid is hier uitgedrukt als een genormaliseerde entropie: 0 betekent dat we heel zeker zijn over de lithoklasse, 1 is dat we heel onzeker zijn.

Om de consistentie tussen lithoklasse, GLG, en rijpingsklasse te waarborgen is na interpolatie een nabewerking uitgevoerd:

- Veen en zand krijgen altijd rijpingsklasse “0” (= niet van toepassing);
- Voxels beneden GLG-niveau krijgen rijpingsklasse ”1” (ongerijpt); Hoewel in zeer droge jaren de grondwaterstand onder de GLG kan zakken wordt verondersteld dat dit geen extra rijping van de lagen onder de GLG veroorzaakt.
- Klei- en zavelvoxels met rijpingsklasse “0” krijgen rijpingsklasse “5” (volledig gerijpt) als het de bovenste laag betreft (0 - 0.2 m-mv). Anders wordt de rijpingsklasse

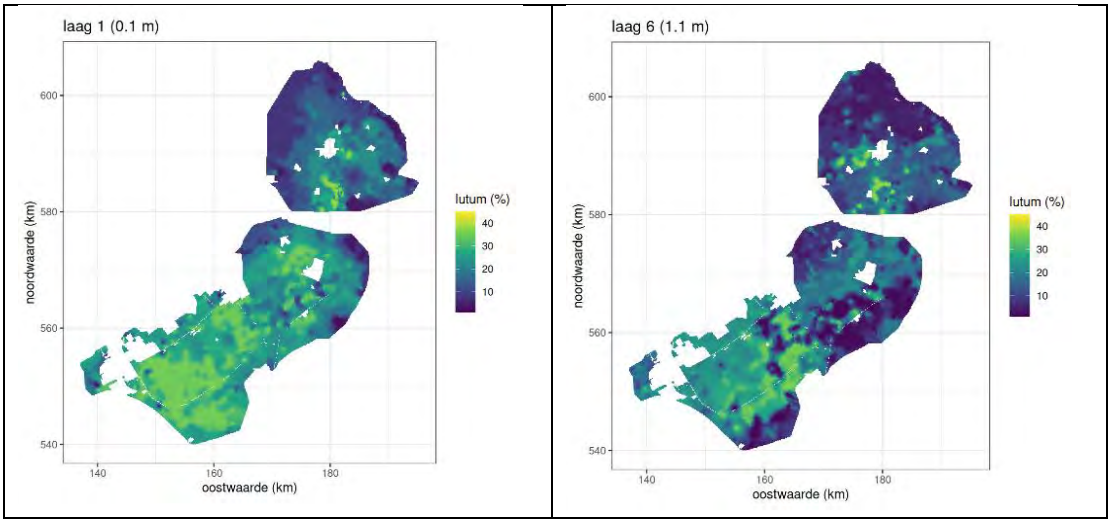
afhankelijk gesteld van de GLG: de laag net boven GLG-niveau krijgt rijpingsklasse “1-3”, die daarboven “4”, en de lagen daarboven “5”.

Figuur 15 geeft de geïnterpoleerde rijpingsklasse voor laag 1 en laag 6. Voor de overige lagen wordt verwezen naar bijlage 19E..



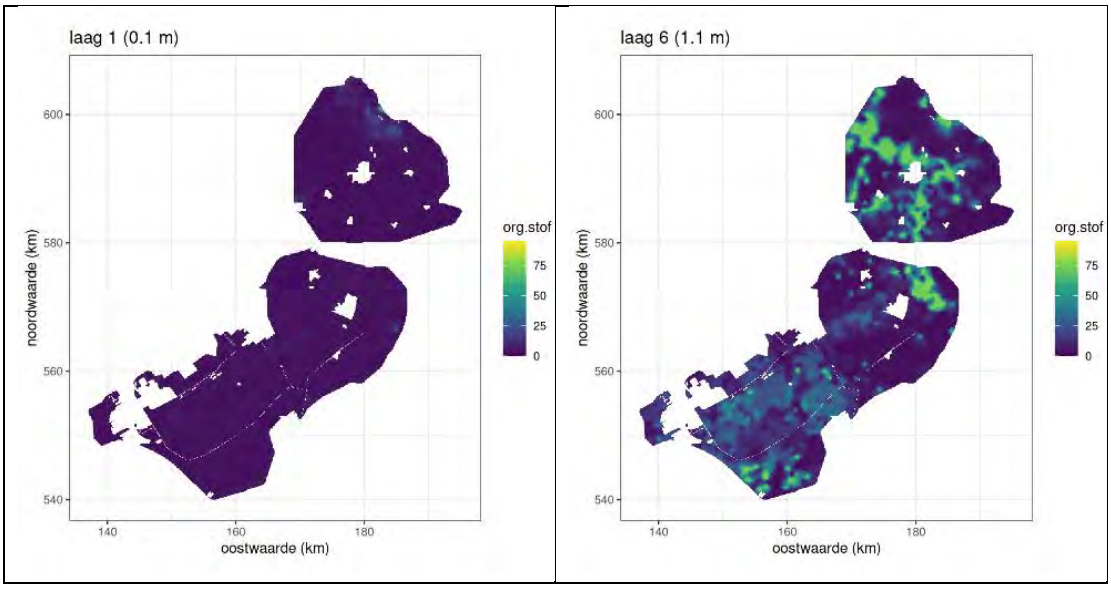
Figuur 15 De geïnterpoleerde rijpingsklasse voor laag 1 (links) en laag 6 (rechts) van het voxelmodel.

Figuur 16 geeft de geïnterpoleerde massapercentages lutum voor laag 1 en laag 6. Voor de overige lagen wordt verwezen naar bijlage 19E.



Figuur 16 De geïnterpoleerde massapercentages lutum voor laag 1 (links) en laag 6 (rechts) van het voxelmodel.

Figuur 17 geeft de geïnterpoleerde massapercentages organische stof voor laag 1 en laag 6. Voor de overige lagen wordt verwezen naar bijlage 19E.



Figuur 17 De geïnterpoleerde massapercentages organische stof voor laag 1 (links) en laag 6 (rechts) van het voxelmodel.

In de bodemkunde en de geologie is het gebruikelijk om het lutumgehalte uit te drukken als massapercentage op de minerale delen. Voor Atlantis is echter het massapercentage lutum nodig uitgedrukt op de totale massa grond (dus inclusief organische stof).

We rekenen het lutumgehalte uitgedrukt als massapercentage op de minerale delen (L) om naar het lutumgehalte uitgedrukt als massapercentage op de totale massa grond (L') met de volgende expressie:

L' = L(1 - H/100)

waarin H het massapercentage organische stof is.

Het boven- en ondergrondmodel zijn gecombineerd door de bovenste 1,60 m van het ondergrondmodel te vervangen door die van het bodemmodel. Door de TNO lithoklassen en de WENR lithoklassen te aggregeren naar een kleinere set lithoklassen bestaande uit de hoofdgroepen klei, veen, zand en zavel proberen we abrupte overgangen tussen het bodemmodel en het diepere ondergrondmodel te reduceren. Voor het ondergrondmodel gebruiken we daarvoor de volgende aggregaties: veen (vnl Hollandveen) en veen op pleistoceen worden samengevoegd tot veen, klei blijft klei, zandige klei wordt zavel, en zand blijft zand.
De aggregatie van het bodemmodel is als volgt: veen, zandig veen, kleiig veen, venig zand, en venige klei worden samengevoegd tot veen, lichte klei en matig zware klei worden samengevoegd tot klei, kleiig silt, matig lichte zavel, zandige leem, zeer lichte zavel, en zware zavel worden samengevoegd tot zavel, en grind, kleiarm zand, kleiig zand, leemarm zand, sterk lemig zand, zeer sterk lemig zand, en zwak lemig zand worden samengevoegd tot zand.

8.4 NAP hoogte

Het vervaardigde voxelmodel van de ondergrond is in eerste instantie geproduceerd t.o.v. maaiveld. In dit geval betekent dit dat het voxelmodel overal een vaste basis heeft van 10 meter onder maaiveld, waarbij iedere verticale kolom is opgebouwd uit een stapeling van 50 voxels met een dikte van 20 cm. Echter, voor het gebruik in Atlantis moet de hoogte in m NAP worden toegekend aan de voxels. Deze informatie is toegevoegd door de basis van het model (voorheen 10 m-mv) een absolute hoogte van in totaal 10 meter onder de maaiveldhoogte in m NAP te geven. Hiervoor is het 5x5 meter rasterbestand van het Actueel Hoogtebestand Nederland 4 (AHN4) gebruikt. Dit is verwerkt tot een 100x100 meter grid, door de mediane maaiveldhoogte van alle 5x5 meter cellen binnen een 100x100 meter cel, toe te wijzen aan die cel.

9 Kartering rijpingsgraad

9.1 Werkwijze

In Flevoland komen op diverse locaties ongerijpte of onvolledig gerijpte bodemhorizonten voor op relatief ondiepe bodemniveaus (boven de GLG). De rijpingsgraad is op twee manieren beschikbaar: 1. Eenvoudige veldtest; 2. Berekend op basis van een set van gemeten/geschatte bodemparameters die resulteren in de n-waarde (zie bijlage 19C).

Uit vooronderzoek is gebleken dat de dataset (2) op basis van metingen erg beperkt is en niet bruikbaar voor een gebiedsdekkend beeld. Er is daarop alleen gebruik gemaakt van de veldmetingen.

In 2018 is de bodemkaart vernieuwd (Brouwer et al, 2018). Voor het actualiseren van de bodemkaart zijn nieuwe boringen uitgevoerd en is gekeken of oude databestanden nog geschikt waren:

- Voor de Noordoostpolder vormen de 477 nieuwe boormonsterbeschrijvingen, samen met 76 (alleen vanaf 2005) boorgegevens uit BIS Nederland en 3351 boorgegevens uit het DINO Loket (alleen gebruikt voor de bepaling pleistocene zanddiepte en maaiveldhoogte) de kalibratieset voor de modellen waarmee de ruimtelijke voorspellingen is uitgevoerd voor het deelgebied van de Noordoostpolder. Validatie heeft plaatsvonden met 35 aparte boringen
- Voor Oostelijk en Zuidelijk Flevoland vormen de 730 nieuwe boormonsterbeschrijvingen, samen met 45 boorgegevens uit BIS Nederland en 67 boorgegevens uit het DINO Loket de kalibratieset voor de modellen waarmee de ruimtelijke voorspellingen is uitgevoerd voor het deelgebied Oostelijk en Zuidelijk Flevoland. Validatie heeft plaatsgevonden met 77 aparte boringen
- De nieuwe boringen hebben zich gericht op het verzamelen van actuele informatie over de laagopbouw van de ondergrond tussen 1,2 en 3,5 à 4 m –mv. met speciale aandacht voor de begindiepte van de pleistocene ondergrond en slappe kleilagen, en de dikte van het minerale dek en de veenlagen.

De diverse puntdata leveren o.a. data over de diepteligging, de bodemkundige en geologische indeling, het type veen en de mate van rijping. Verder is van elke locatie bekend wat de maaiveldhoogte is en is een schatting gemaakt van de GHG en GLG. Deze data zijn te vinden op www.bodemdata.nl. Van alle puntdata is bekend of er klei voorkomt en in welke mate deze klei is gerijpt (Tabel 4). Om een verklaring te vinden voor het al dan niet aanwezig zijn van ongerijpte klei is o.a. gekeken naar landgebruik, kwel/infiltratie; GLG en ontstaansgeschiedenis. Tenslotte is een vergelijking gemaakt tussen de diepte waarop ongerijpte klei wordt aangetroffen en de op locatie gemeten GLG.

Tabel 4 Voorbeeld van puntdata met informatie over de aanwezigheid en diepte van ongerijpt klei.

	laag nr	boven- grens	onder- grens	hor.code	geo info	veen- soort	org. stof %	lutum %	leem %	M50	kalk	rijping
		cm-mv	cm-mv				%	%	%	um		
331200 (2017)	1	0	30	1Ap	Marien		2	14			kalkrijk	gerijpt
	2	30	60	1Cg1	Marien		0.5	7	10	100	kalkrijk	
	3	60	100	1Cg2	Marien		1.5	22			kalkrijk	gerijpt
	4	100	160	1Cri	Marien		0.5	26			kalkrijk	half gerijpt
	5	160	295	1Cri	Marien		0.5	32			kalkrijk	bijna ongerijpt
	6	295	300	2Cri	Eolisch en Fluvio-periglaciaal		0.5	2	4	160	kalkloos	
	7	300	310	2Cr2	Eolisch en Fluvio-periglaciaal		1	4	4	140	kalkloos	

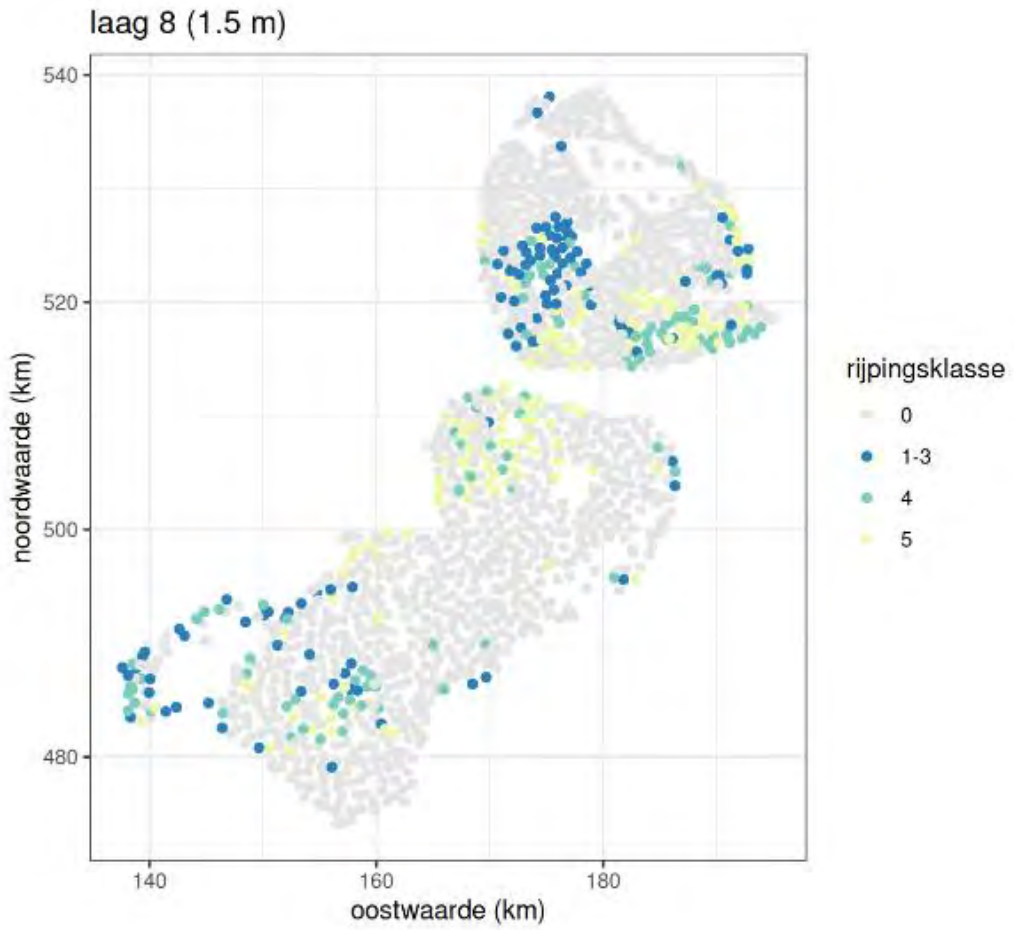
Tabel 5 rijpingsklasses, n-waarde en beschrijving rijping kleilagen

n-waarde	rijpingsklasse	beschrijving
0,7	5	gerijpt
0.85	4	vrijwel gerijpt
1,2	3	half gerijpt
1,7	2	vrijwel ongerijpt
2,2	1	ongerijpt
0	0	geen klei

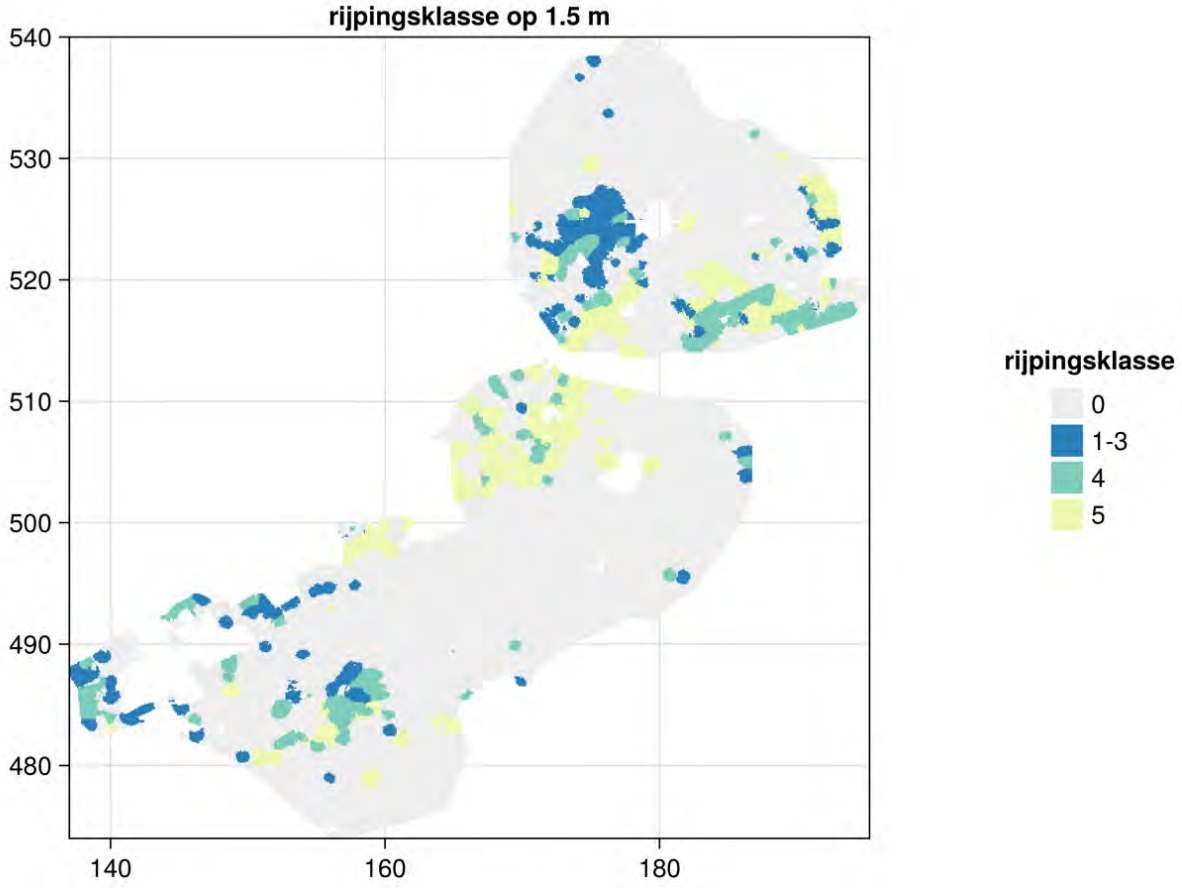
9.2 Resultaten

Bij circa 100 boorlocaties is in het profiel een bepaalde mate van ongerijpte klei aangetroffen. De rijpingsgraad is verdeeld in vijf klasses (Tabel 5). Per laag van 20 cm is per boorlocatie de mate van rijping aangegeven (zie Figuur 18 als voorbeeld, volledig overzicht in bijlage 19E). In het voxelmodel (hoofdstuk 8) zijn per voxellaag de puntdata geïnterpoleerd naar een vlakdekkend geheel. Om hier indicatie van te geven is de rijpingsklasse van het diepste ondiepe voxel (1,5 m-mv) weergeven (Figuur 19).

De kleien van Flevoland zijn voor het grootste gedeelte gerijpt. Belangrijkste gebieden met nog ongerijpte gronden zijn: een gebied ten westen van Emmeloord; een gebied aan de zuidoostelijke rand van de Noordoostpolder, een gebied in het centrum van de Zuidelijk Flevoland en een gebied ten noorden van Almere. Het landgebruik, de kwel/infiltratie en de GLG geven niet een duidelijke verklaring voor het voorkomen van ongerijpte klei. De belangrijkste verklarende parameter is het afzettingsmilieu. Zo was er ten westen van Emmeloord een binnenmeer; deze is opgevuld met “Union klei” en met “Cardiumklei” (Figuur 20 Verspreiding Union klei (Wiggers, 1955)). Dit zijn (vrij zware) zeekleien en zouden daarom veel langzamer rijpen. In Zuidelijk Flevoland lijken de niet-gerijpte kleien met name voor te komen ter hoogte van kleiaanvulling van de Eembedding (Figuur 21).
Omdat de ongerijpte kleien zowel voorkomen in de oudste gedeeltes van Flevoland als in de nieuwere delen is het tijdstip van drooglegging niet een goede maat voor de mate van rijping of de rijpingssnelheid. Zo komen er in de Noordoostpolder 80 jaar na de drooglegging nog ongerijpte kleien voor. De rijpingsdata bieden daarmee ook onvoldoende basis om een goede inschatting te maken van de snelheid waarmee de ongerijpte kleien naar een volledige gerijpte toestand zullen zijn overgegaan. Mogelijk zullen bepaalde delen nooit volledig rijpen. Vooralsnog wordt uitgegaan van 90 jaar +/- 30 jaar; sterk afhankelijk van uitdrogingssituatie.
Om te bepalen of de volcapillaire zone van invloed is op de mate van rijping is een vergelijking gemaakt tussen de diepte waarop ongerijpt (klasses 1-5, 0 = geen klei)) klei wordt aangetroffen en de GLG (Figuur 22). Het blijkt dat voor de niet-gerijpte lagen (1-4) gemiddeld gezien op of onder de GLG liggen. Dit betekent dat de volcapillaire zone geen bescherming lijkt te bieden tegen het rijpingsproces.



Figuur 18 De verspreiding ongerijpte klei op 1,5 m -mv . 0 = geen klei, 1 is ongerijpt- 5 is volledig gerijpt (data boorlocaties)

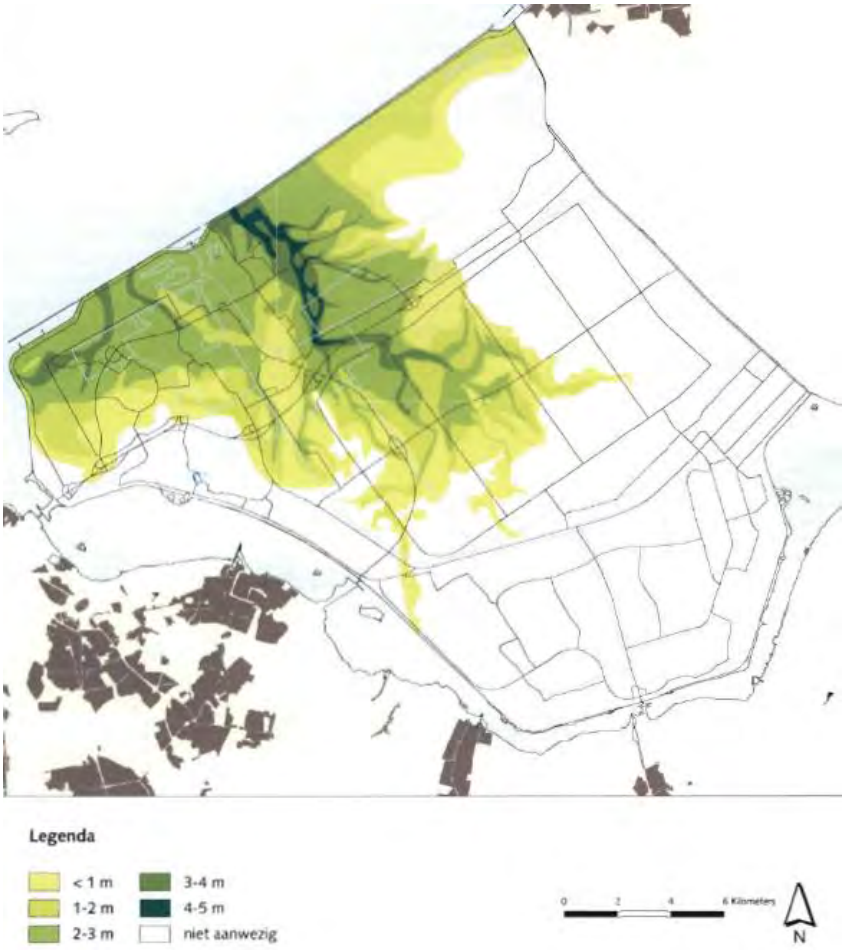


Figuur 19 Verspreiding ongerijpte klei op 1,5 m -mv . 0 = geen klei, 1 is ongerijpt- 5 is volledig gerijpt (geïnterpoleerd).

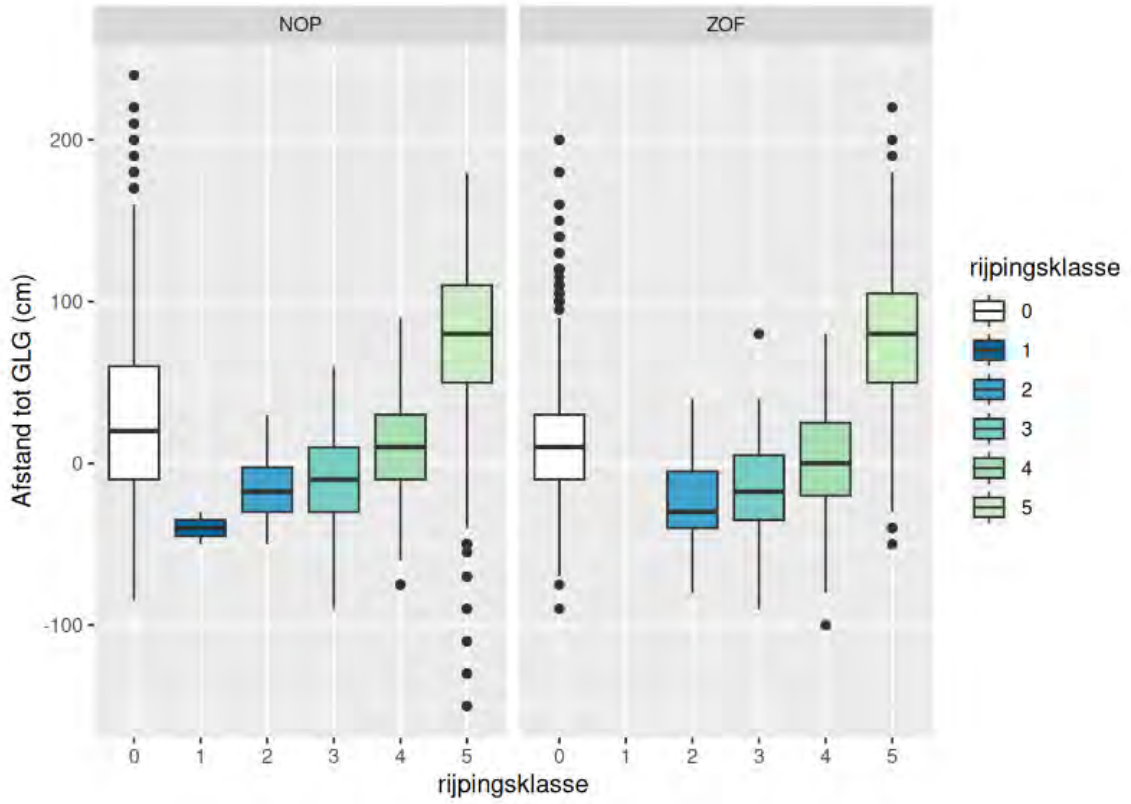
1. Unioklei-gebied in sectie H en omgeving
   Unio-clay area in section H and environments
2. Unioklei plaatselijk aanwezig als een kleilaag in het veen of als opvulling van van kreken en geulen
   Unio-clay only locally present as a clay layer in the peat or as the filling of creeks and channels
3. Unioklei in hoge oeverstroken langs de geulen
   Unio-clay in high-lying ridges (levees) along the channels
4. zandwal
   sand ridge

FIG. 21. De verbreiding van de Unioklei.
The distribution of the Unio-clay.

Figuur 20 Verspreiding Union klei (Wiggers, 1955)



Figuur 21 Verspreiding oude zeeklei-afzetting (Menk et al, 1998)



Figuur 22 box-and-whisker plots voor de Noordoostpolder (NOP) en Zuidelijk en Oostelijk Flevoland (ZOF) geven de relatie weer tussen de rijpingsklasse en de afstand tot de GLG. De horizontale lijn in het midden van elke box is de mediane waarde. De box zelf wordt begrensd door de kwartielen. De verticale lijnen geven de 'spreiding' van de gegevens, en de punten potentiële uitbijters (outliers) (0= geen klei, 1 = volledig ongerijpt, 5 = volledig gerijpt)

10 Kartering veentypen

10.1 Werkwijze

Door diverse afzettingsmilieus is er in Flevoland een groot aantal verschillende veentypes ontstaan. Uit het BRO-archief zijn de boringen geselecteerd waar tot een diepte van 1,6 m-mv een of meerdere horizonten veen- of moerige lagen voorkomen (n= 2337). Van deze horizonten is bepaald, welk type veen het is, wat de trofiegraad is (eutroof, mesotroof of oligotroof) en hoeveel klei wordt aangetroffen (veldschatting) (Tabel 6).

Tabel 6 Karakterisering veenlagen tot 1.6 m-mv Flevoland (afkorting zie Tabel 7)

Veensoort	**Trofie**	**Aantal**	**Lutum (%)**		
			Gemiddeld	**Min**	**Max**
BA	eutroof	8	31	25	40
B	eutroof	27	28	12	40
BE	eutroof	75	21	5	30
DK	eutroof	66	23	4	40
VV	eutroof	1365	17	1	40
R	eutroof	19	22	10	40
GY	eutroof	97	19	15	22
GL	eu-/mesotroof	3	16	3	30
OV	eu-/mesotroof	26	17	1	30
CR	eu-/mesotroof	25	15	10	30
RC	meso-/eutroof	260	12	1	32
BM	mesotroof	127	14	1	30
C	mesotroof	161	10	1	30
DV	mesotroof	25	11	1	25
DZ	oligotroof	27	6	2	20
S	oligotroof	24	8	1	15
SP	oligotroof	1	12	12	12
WO	oligotroof	1	5	5	5

Tabel 7 Veensoorten

veensoort (alleen voor moerige lagen)

J	=	bolster
SP	=	spalterveen
S	=	overig veenmosveen
C	=	zeggeveen
RC	=	rietzeggeveen
BM	=	mesotroof broekveen
B	=	boveen
BE	=	eutroof broekveen
R	=	rietveen
CR	=	zeggerietveen
BA	=	bagger
VV	=	verslagen veen, detritus
GL	=	gliede
GY	=	gyttja
D	=	veraard of verweerd veen
DZ	=	relatief zandrijk
DK	=	relatief kleirijk
DV	=	overige
L	=	strooisellaag
OV	=	overige veensoorten (bijv. Scheuchzeriaveen)

Vervolgens zijn de diverse veensoorten ingedeeld in vijf klasses op basis van de trofiegraad (Tabel 8). De trofiegraad wordt als belangrijkste bepalende factor gezien voor de oxidatiesnelheid (zie ook 12.2.2)

Tabel 8 Indeling veensoorten naar veenklasses

Akorting veensoort	**Veenklasse**
BA", "B", "BE", "DK", "VV", "R", "GY":	eutroof
"GL", "OV", "CR", "RC":	eu-/mesotroof
BM", "C", "DV":	mesotroof
"DZ", "S", "SP", "WO":	oligotroof
"VV":	verslagen

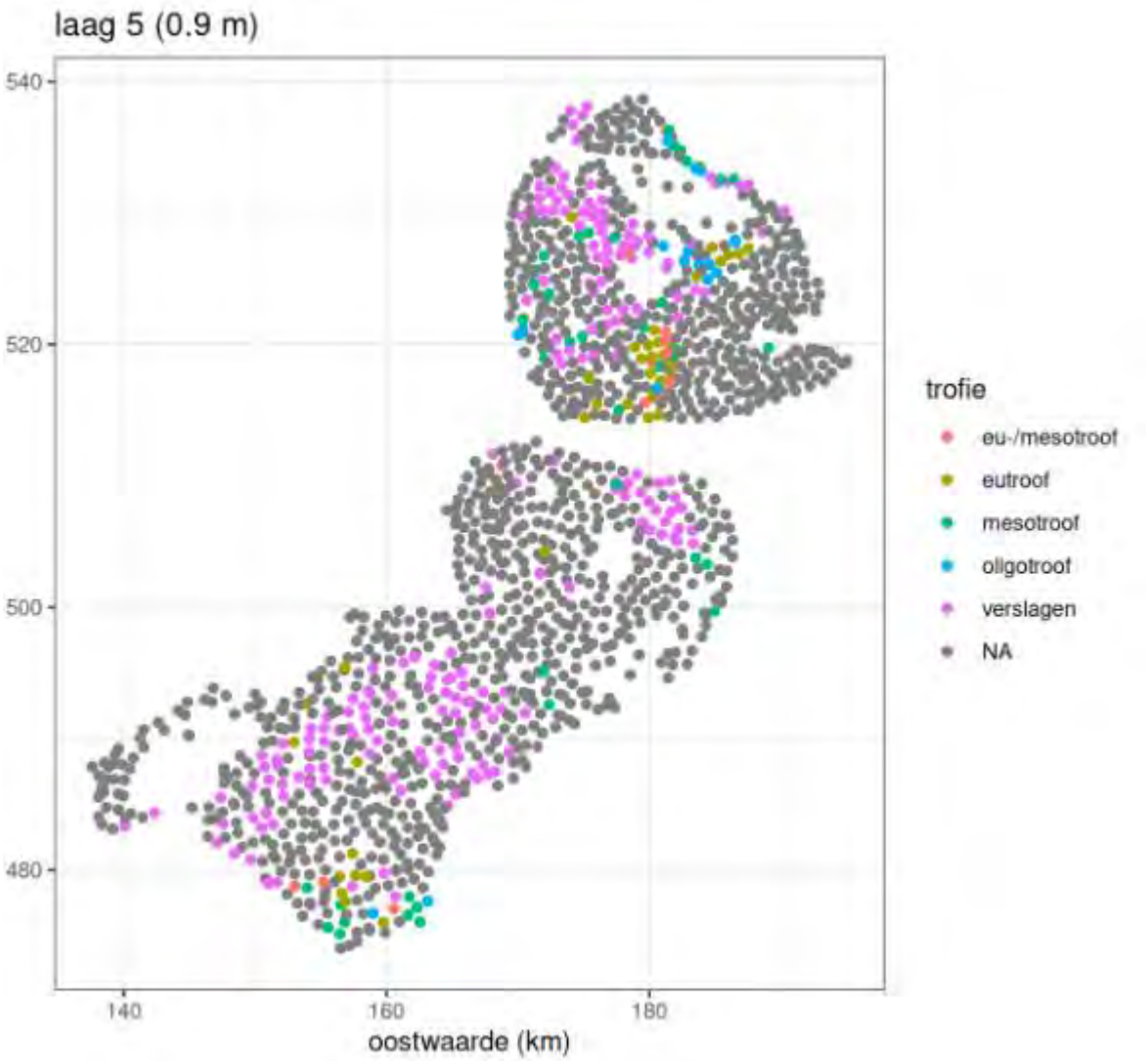
10.2 Resultaten

Diverse boorlocaties laten een groot aantal verschillende veensoorten zien. De veensoorten zijn verdeeld in vijf klasses (Tabel 8). Per laag van 20 cm is per boorlocatie de veenklasse bepaald. Figuur 23 en Figuur 24 geven een beeld van de veenklasse per datapunt op een diepte van 0,9 en 1,5 m-mv. In het voxelmodel (hoofdstuk 8) zijn per voxellaag de puntdata geïnterpoleerd naar een vlakdekkend geheel. Om het veentype in Flevoland in beeld te vatten is in Figuur 25 een geïnterpoleerde kaart weergeven van de veensoorten op 1,1 m-mv. Ondanks dat de veentypes in de diepte variëren kan deze figuur worden gebruikt om een algemeen beeld te krijgen van de veensoorten in de bovenste 1,6 m. De volledige kaarten per voxellaag van het veentype en geïnterpoleerde veensoorten zijn te vinden in bijlage 19E.

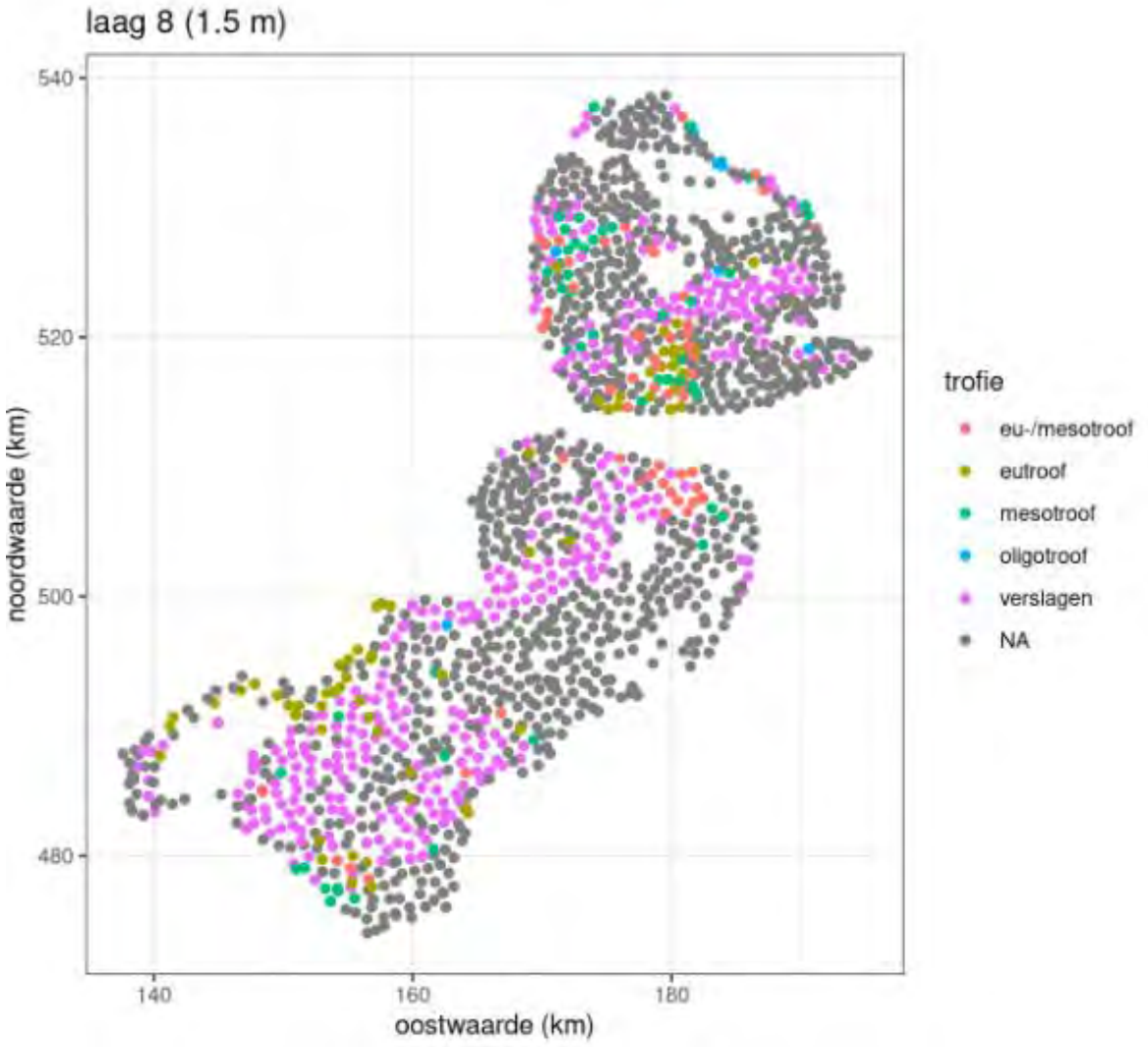
Het grootste gedeelte van het veen in Flevoland bestaat uit verslagen veen. Uitzondering is Schokland, op dit voormalig eiland wordt een min of meer onverstoorde veenondergrond (in situ) bestaande uit broekvenen (eutroof) en zeggevenen (mesotroof) gevonden. Verder worden er in de volgende gebieden andere veentypes gevonden. Hierbij is niet altijd mogelijk een relatie te leggen met de (veelal complexe) ontstaansgeschiedenis:

- Rand van Almere en Oostvaardersplassen. Hier wordt Glyde en Gyttja (eutroof) gevonden;
- Rand zuidelijk Flevoland. Hier worden mesotrofe venen gevonden;
- Midden-west Noordoostpolder. Hier worden zeggevenen (Mesotroof) gevonden;
- Verspreid Noordoostpolder. De oligotrofe venen liggen in de buurt van ondiep gelegen dekzand (dekzandopduiking).

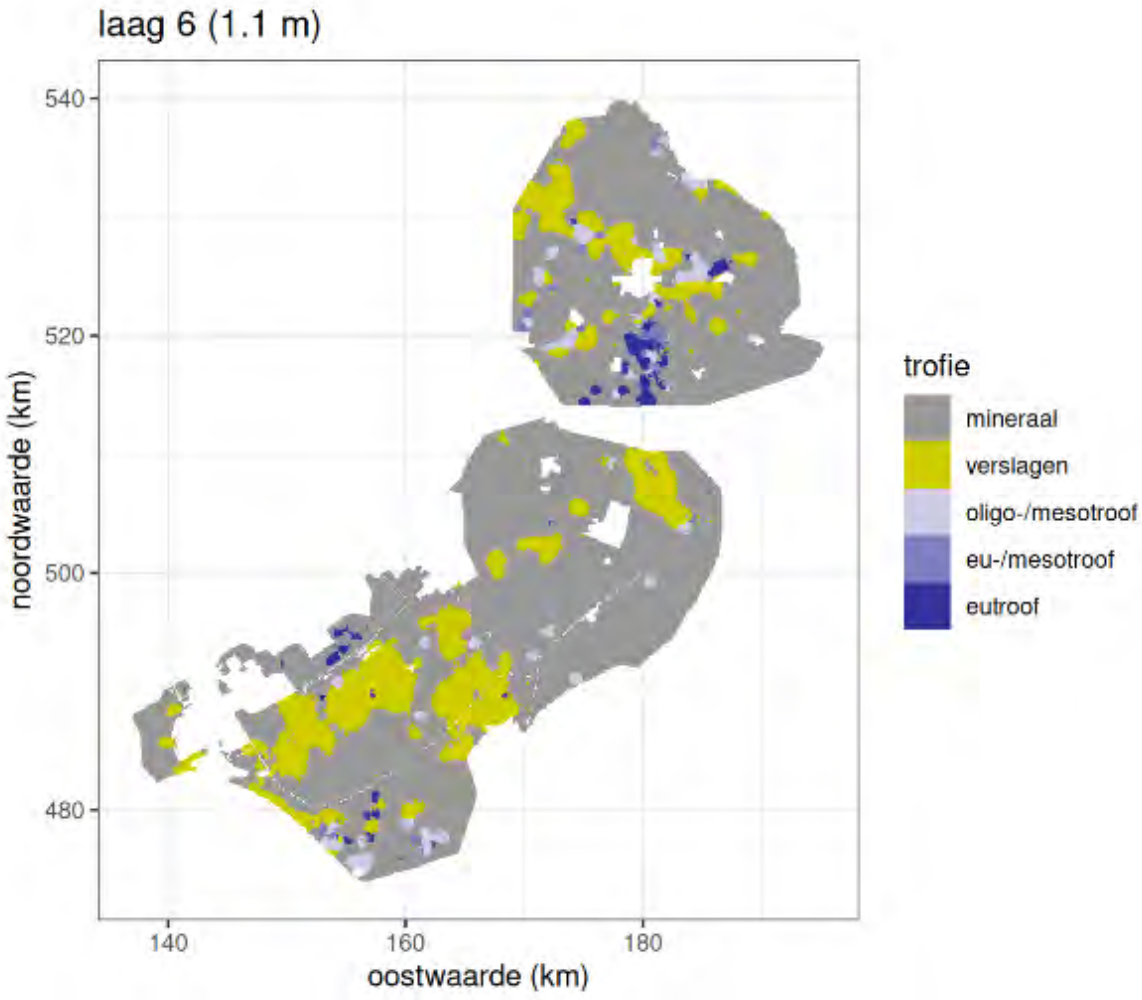
Dieper dan 1,6 m-mv zijn beperkte boordata met een veentypering beschikbaar. Uit de beperkte diepe boringen blijkt dat meer naar de diepte er meer zegge- en broekveen wordt gevonden en dat het aandeel verslagen veen sterk afneemt. Zegge- en broekveen bevat meer organische stof en minder lutum dan de verslagen venen.



Figuur 23 Veentypering op 0,9 m-mv (puntdata)



Figuur 24 Veentypering op 1,5 m-mv (puntdata)



Figuur 25 Veentype op 1,1 m-mv (geïnterpoleerd)

11 Rekenwijze rijping

11.1 Inleiding

Rijping vindt plaats bij het droogvallen (drainage/ontwatering) van klei-rijke sedimenten die onder water zijn afgezet. Luchtindringing in de bodem zet fysische en chemische veranderingen in gang waarbij het slappe sediment geleidelijk verandert in een stevige, doorlatende bodem met structuur. Fysische rijping gaat gepaard met een onomkeerbaar verlies aan water en een aanzienlijk volumeverlies, variërend van 10% bij lichte zavel tot wel 30% bij zware klei (Jongmans *et al.* 2013). Dit wordt ook wel (onomkeerbare) krimp genoemd. Wateronttrekking door begroeiing versnelt het rijpingsproces aanzienlijk. Door het volumeverlies ontstaan rijpingsscheuren in de bodem en treedt maaivelddaling op.

In de Flevopolders was rijping (krimp) een hoofdoorzaak van de bodemdaling door de drooglegging van de waterbodems van het IJsselmeer. Grote delen van het minerale dek zijn inmiddels sterk gerijpt waardoor een verdere bijdrage aan bodemdaling afwezig of zeer beperkt is. Echter, op diverse locaties in Flevoland komen desondanks nog ongerijpte of onvolledig gerijpte bodemhorizonten voor op relatief ondiepe bodemniveaus (boven de GLG). Dat betekent dat op deze locaties ook nu nog rekening moet worden gehouden met een rijpingsbijdrage (restrijping). Bovendien is klei en zavel beneden de diepste grondwaterstand over het algemeen niet aan uitdroging blootgesteld, wat betekent dat in scenario's waarbij de grondwaterstand (GLG) zou worden verlaagd, rijping weer zal gaan bijdragen. Er is daarom besloten om rijping als apart bodemdalingsproces mee te nemen in de bodemdalingsprognose voor Flevoland (zie uitgangspunt 2 in hoofdstuk 2). Omdat bij aanvang van dit project rijping in Atlantis ontbrak, is hiervoor een nieuwe rekenwijze opgesteld.

11.2 Uitgangspunten

De volgende uitgangspunten zijn gebruikt bij het opstellen van de rekenwijze.

- De rekenwijze maakt gebruik van de GLG als de algemene stuurvariabele voor de karakterisatie van grondwatercondities in Atlantis.
- Als toestandsvariabele die de mate van rijping karakteriseert word gebruik gemaakt van het bestaande concept *n-factor* (rijpingsgraad of rijpingsgetal) (Pons en Zonneveld, 1965). Zie bijlage 19B..
- Rijping is compleet als een laagste limietwaarde voor de n-factor is bereikt. Er kan dan geen verdere rijping meer plaatsvinden.
- Rijping is onomkeerbaar.
- Rijping is een proces (volumeafname van voxels) dat ook bij gelijkblijvende grondwatercondities (hier GLG) plaatsvindt[14]. Het alternatief zou zijn dat een forcering (GLG verandering ten opzichte van het bodemmateriaal) nodig is om volumeverlies door rijping te bewerkstelligen. Hoewel er geen zekerheid bestaat over de juiste zienswijze, pleiten de volgende overwegingen voor het gekozen uitgangspunt:
  - Het feit dat rijpingsgraad globaal toeneemt met de ouderdom van diverse andere, oudere polders, zoals in de Dollard.
  - Bij de drooglegging van Flevoland was natuurlijk sprake van forcering door de drooglegging en ontwatering. Vervolgens was echter ook sprake van een

[14] Dit wordt ook wel een seculair proces genoemd.

seculaire ontwikkeling; rijping als naijling die in ieder geval decennia lang door heeft gewerkt, en mogelijk nog steeds gaande is.

- Bij bodemkartering rond 2000 is geconstateerd dat in Noord- Zuid Holland (De Vries et al, 2017) de rijpingsgraad van bodemhorizonten was toegenomen in vergelijking met de karting in de 60' en 70 er jaren. Dit is in ieder geval niet strijdig met een seculair karakter van de rijping, maar forcering door veranderd landgebruik en ingrepen in de waterhuishouding zullen hier ook aan hebben bijgedragen en mogelijk ook dominant zijn geweest.

11.3 Rekenwijze

De afname rijpingsgraad n wordt beschreven als exponentiële relatie (met een e-folding tijdschaal τ die bepaalt hoe snel de eindtoestand wordt 'bereikt')

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_{gerijpt} - n}{\tau} \tag{1}$$

Bij ongewijzigde omstandigheden volgt dan bij een startwaarde n_{start} op $t = t_{start}$

$$n(t) = n_{gerijpt} + (n_{start} - n_{gerijpt}) \cdot e^{-(t - t_{start})/\tau} \tag{2}$$

Voor een tijdstap van eindige grootte Δt van t naar $t + \Delta t$:

$$n(t + \Delta t) = n(t) + \left(n(t) - n_{gerijpt}\right)\left(e^{-\Delta t/\tau} - 1\right) \tag{3}$$

Een afname van rijpingsgraad voor een tijdstap of stress periode die volgt uit (1) wordt vertaald naar een relatieve volumeafname (= volumerek) van een voxel (of deel van een voxel dat binnen het rijpingsbereik ligt).

$$\Delta V / V_{ref} = factor \cdot \Delta n \tag{4}$$

Afname levert hier een negatief getal. Voor V_{ref} wordt uit praktisch oogpunt gekozen voor het grondvolume bij de rijpingsgraad bij de start van de berekening, n_0 . Daardoor kunnen de volumeveranderingen ΔV voor een tijdstap worden berekend uit het start volume van een voxel. In de implementatie is ervoor gekozen om zowel het referentievolume als n_0 elke tijdstap te updaten[15]. De $factor$ voor het model van Pons en Zonneveld (1965) (afleiding in bijlage 19C):

$$factor = \frac{(L + bH)/\rho_w}{n_0(L + bH)/\rho_w + 0{,}2R/\rho_w + C} \tag{5}$$

$$R = 100 - L - H$$
$$C = R/\rho_R + H/\rho_H + L/\rho_L$$

[15] Een belangrijke reden is dat voxels gedurende de berekening kunnen worden 'opgeknipt' wanneer een deel ervan geen rijping moet ondergaan; daardoor ontstaat er een nieuw referentievolume. Ook kan het volume afnemen door andere processen als oxidatie van organisch materiaal in organisch-rijke klei.

Benodigde parameters zijn:

L, H	(massapercentage t.o.v. vaste stof)
$\rho_w, \rho_L, \rho_H, \rho_R$	(dichtheid water en vaste stof componenten)
n_0	(startwaarde rijpingsgetal)

Voor de relatieve hoogteverandering van een voxel (of deel van een voxel dat binnen het rijpingsbereik ligt) is verder een geometrie factor r nodig

$$\frac{\Delta H}{H} = \left(1 + \frac{\Delta V}{V}\right)^{1/r} - 1 \tag{6}$$

Hierin geeft $r = 3$ uniforme krimp in alle richtingen (isotroop) en $r = 1$ puur verticale krimp (Rijniersce (1983)) .

Er wordt een ondergrens voor het rijpingsbereik in de bodem gedefinieerd dat een hoogte $H^0_{v,rijping}$ boven de GLG ligt (vergelijkbaar met de rekenwijze bij oxidatie).

Om te kunnen rekenen moeten waarden voor n, L en H bij aanvang zijn toegekend aan alle voxels. Deze parametrisatie wordt toegelicht in Hoofdstuk 15. Omdat voxels die bij aanvang beneden het rijpingsbereik liggen op een later tijdstip in principe na verloop van tijd binnen het rijpingsbereik kunnen komen en vervolgens aan indroging en rijping worden blootgesteld, moeten alle voxels een n-waarde worden toegekend.

12 Rekenwijze oxidatie

12.1 Rekenwijze

De bestaande rekenwijze in Atlantis voor oxidatie is gebruikt[16] (Erkens e.a., 2021). De methode is gebaseerd op de langjarige waarnemingen aan maaivelddaling door veenoxidatie op de locatie van het veenweide innovatiecentrum (VIC) te Zegveld en een aantal andere locaties in Nederland (van den Akker e.a. 2007). Op basis van deze metingen zijn door van den Akker lineaire relaties opgesteld tussen de maaivelddalingssnelheid en GLG. Dat is gedaan voor veen zonder kleidek, veen met een kleidek, en voor veen met kleidek met een toepassing van een correctie voor kleidekdikte.
In de methode is de relatie tussen de GLG en maaivelddalingssnelheid door oxidatie omgezet naar een massa-gebaseerde oxidatiesnelheid (in massa organisch materiaal dat wordt geoxideerd per volume bodemmateriaal per tijdseenheid). De hoeveelheid daling die een voxel kan leveren door oxidatie van organisch materiaal wordt bepaald door het organisch stofgehalte van de voxel (massa organische stof per massa droge stof). Dit maakt dat oxidatie niet alleen wordt toegepast op veenlagen, maar op alle lagen waarvoor een organisch stofgehalte groter dan een gedefinieerde grenswaarde aanwezig is. Verder is daardoor de volumeverandering voor een organisch-rijke klei geringer dan voor een schoon veen bij eenzelfde hoeveelheid aan geoxideerd organisch materiaal. De berekeningen betreffen bodemdaling door aerobe oxidatie, dus door invloed van zuurstofindringing in de bodem.

Voor de kwantitatieve beschrijving van de methode wordt verwezen naar Erkens e.a. (2021; hoofdstuk 6). De belangrijkste parameters die worden gebruikt in de methode zijn:

α	oxidatiesnelheid/afbraaksnelheid	kg/m^3/dag

Voor de nationale bodemdalingsvoorspellingskaarten is hiervoor één waarde gehanteerd van 4,6x10^{-3} kg/m^3/dag die hoofdzakelijk is bepaald door bovengenoemde waarnemingen uit het veenweidegebied bij Zegveld.

$H^0_{v,oxidatie}$	hoogte boven de GLG zonder oxidatie	m

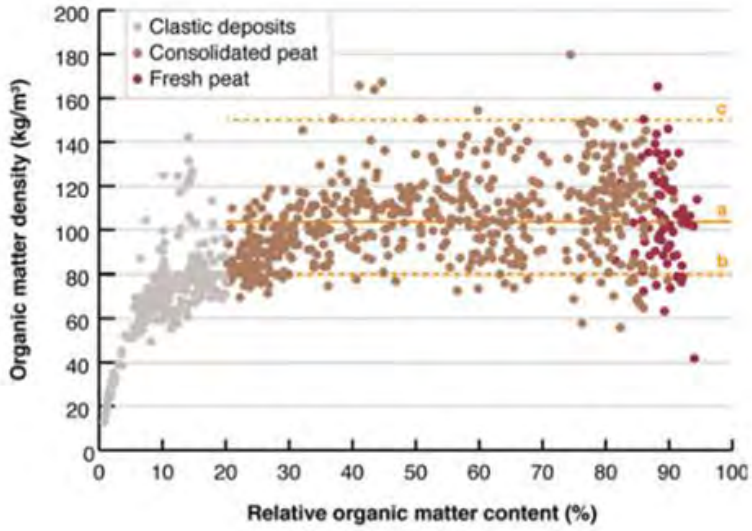
Het dieptebereik in de bodemkolom waarbinnen oxidatie wordt berekend strekt zich niet uit van maaiveld tot de GLG, maar tot een ondieper niveau dat daar $H^0_{v,oxidatie}$ boven ligt. Voor de nationale bodemdalingsvoorspellingskaarten is hiervoor één waarde van 0,3 m gehanteerd. Deze waarde is hoofdzakelijk bepaald door bovengenoemde waarnemingen uit het veenweidegebied bij Zegveld. De parameter vertegenwoordigt naar verwachting o.a. invloeden van capillaire opstijging die zorgen voor een hoge verzadigingsgraad boven de GLG en een sterke beperking van zuurstofindringing.

ρ^{max}_{org}	maximale bulk dichtheid organische stof (schoon veen)	kg/m^3

Deze parameter bepaalt in belangrijke mate het volumeverlies van voxels waarin oxidatie optreedt. Een hogere dichtheid, bijvoorbeeld voor meer samengedrukt veen, betekent minder volumeverlies. Voor de nationale bodemdalingsvoorspellingskaarten is één waarde

[16] Deze methode is in eerdere rapporten aangeduid met 'voorraad-voxel methode', omdat de methode expliciet de boekhouding van het organisch materiaal in een voxel bijhoudt.

gehanteerd van 100 kg/m^3 die ongeveer overeenkomt met de gemiddelde waarde van een grote nationale dataset aan dichtheidsmetingen (Figuur 26).



Figuur 26 Organische stof dichtheidsmetingen als functie van organisch stof gehalte voor een grote nationale dataset (Erkens e.a., 2016). In Atlantis wordt voor de nationale bodemdalingsprognosekaarten een waarde van 100 kg/m^3 gebruikt voor schoon veen (organisch stofgehalte van 100%). Dit komt ongeveer overeen met de gemiddelde waarde aangegeven met de continue horizontale lijn (a) in de grafiek.

12.2 Onderzoek naar gebiedsspecifieke parametrisatie

Er is onderzocht of de parametrisatie voor de drie parameters (α , $H^0_{v,oxidatie}$, $\rho^{\max}_{org}$) zou kunnen worden aangepast voor de specifieke Flevolandse situatie. Daarbij is o.a. gekeken naar mogelijkheden voor ruimtelijke differentiatie van α op basis van veentype en de dikte van het minerale dek (uitgangspunt 2 in hoofdstuk 2).

12.2.1 De invloed van veentypen

Veentypen

De standaardwaarde voor α in Atlantis wordt is hoofdzakelijk bepaald door waarnemingen in Zegveld**.** Zegveld kent overwegend veenprofielen met een dun (15-40 cm) kleidek. Het kleidek is gemiddeld matig zware klei en het onderliggende veen bestaat veelal uit bosveen (eutroof) (soms broekveen). Bosveen heeft een organisch stofgehalte van 50-70% o.s. en ongeveer 10-30% lutumbijmenging. Bosveen is meestal slibrijk. Denk aan zacht ooibos dat regelmatig kon worden overstroomd door rivierwater. Hieronder worden resultaten besproken van een kort onderzoek rond de vraag of de venen die in Flevoland worden aangetroffen anders zijn dan die in Zegveld en in hoeverre daarvoor andere oxidatiesnelheden zouden gelden.

Oxidatiesnelheid

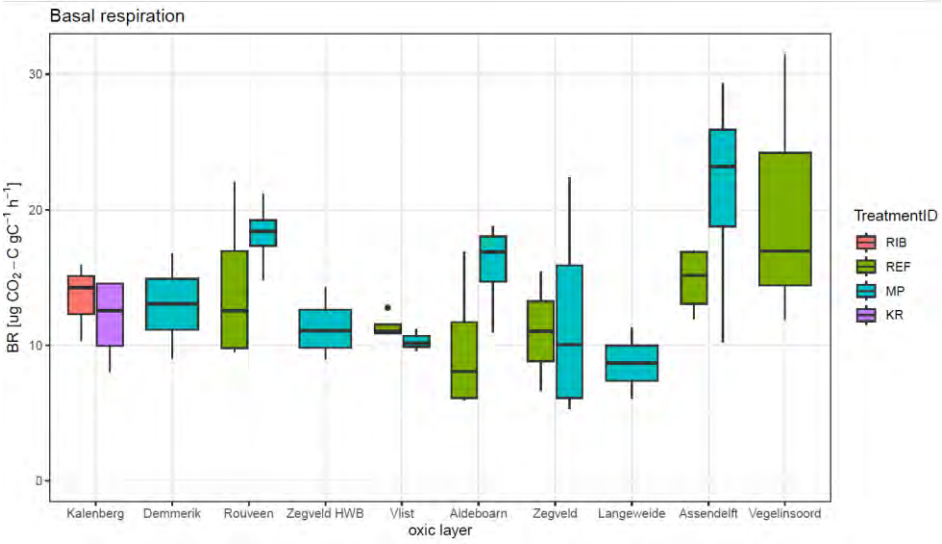
Op basis van de analyse van de diverse veentypes in Flevoland is een vergelijking gemaakt met het veen in Zegveld (Zie ook Hoofdstuk 10).

De venen in Flevoland in de ondiepe ondergrond (tot 1,6 m-mv) zijn sterk afwijkend van het veen in Zegveld. Slechts op enkele locatie worden bos- en/of broekvenen aangetroffen. 60 % van de veenhorizonten is verslagen veen (gesedimenteerd veen); waarschijnlijk heeft dit verslagen veen een veel hogere bulkdichtheid dan andere veensoorten. 70 % van het veen is eutroof, oligotroof veen komt nauwelijks voor. Dit betekent dat de trofiegraad vergelijkbaar is

met Zegveld. De trofiegraad is duidelijk gecorreleerd aan het lutumgehalte. Hoe hoger de trofie, des te hoger is meestal ook het lutumgehalte. Hier moet wel worden opgemerkt dat aan de exacte getallen weinig waarde kan worden gehecht omdat dit schatting uit het veld zijn en geen labmetingen. In veel profielen is het veen aan de bovenkant veraard (DK, DZ en DV) (mondelinge mededeling Brouwer, 2022).

In het kader van het Nationaal Onderzoeksprogramma Broeikasgassen Veenweide (NOBV) is onderzoek gedaan naar de potentiële oxidatiesnelheid (basal respiration rate) van diverse veensoorten (Figuur 27). Hierbij is gekeken naar veen dat voorkomt in het volledige geoxideerd gedeelte, het gedeelte rond de grondwaterspiegel en het gedeelte onder de grondwaterspiegel (anaeroob). Opvallend is dat de oxidatiesnelheid tussen de diverse veensoorten weinig lijkt te verschillen. De enige uitzondering zijn de meer veraarde venen in Vegelinsoord waar een hogere oxidatiesnelheid wordt gemeten. De in Flevoland veel voorkomende verslagen venen zijn in het kader van NOBV niet onderzocht. Het vermoeden is dat de verslagen venen een lagere oxidatiesnelheid en een hogere dichtheid hebben. Doordat metingen ontbreken kan dit niet worden gestaafd.

Op basis van het bovenstaande kan geen onderbouwd verschil in oxidatiesnelheden tussen de diverse venen worden vastgesteld. Voor *prognose 2023* voor Flevoland is daarom geen ruimtelijke differentiatie voor type veen toegepast. Wel is het duidelijk dat de venen in Flevoland sterk afwijkend zijn van de venen die voorkomen in de veenweidegebieden. Om te weten hoeveel invloed een verschil in oxidatiesnelheid kan hebben op de bodemdaling is dit meegenomen in de gevoeligheidsanalyse. Samen met de vervaardigde veentype kaart (paragraaf 10.2)(eutroof veen, mesotroof veen en verslagen veen (ongedifferentieerd)) geeft dit een beeld van de mogelijke implicaties voor de prognose.



Figuur 27 Basal respiration voor diverse veensoorten in het oxische bereik. KR is kragge, RIB is ribbe in Kalenberg is een "natuurlijk" veensysteem met groeiend Riet-Sphagnum vegetatie (deels met dopheide). MP is een maatregel plot dus onderwaterdrainage of andere watermaatregel. RF is referentie om te vergelijken met de MP plot. Moerige gronden op Vegelinsoord is een spalterveen laag van 20-30 cm dik. Demmerik is een toemaakdek op bosveen Andere bosveen sites zijn: Zegveld, Langeweide. Rouveen is een puur (heel mooi) zeggeveen in een kwellocatie. Aldeboarn in een oligotroof veen met heide, veenmos en wollegras dus van oorsprong regenwater afhankelijk maar onder een klei-dek van 40 cm Assendelft is een zegge-rietveen met zoutwater invloeden (heel sulfide rijk mogelijk veel anaerobe afbraak en dan stimulans van afbraakproducten door toediening zuurstof). (bron: Weidner et al, 2023).

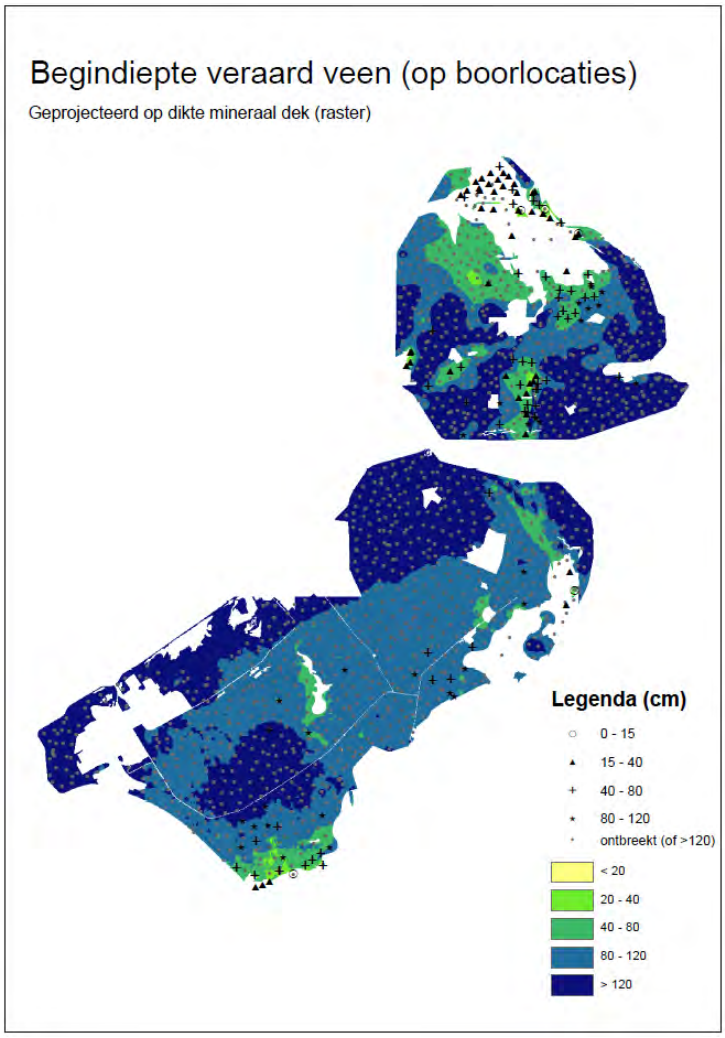
12.2.2 Invloed minerale dek

Een mineraal dek heeft invloed op de aeratie van het er onderliggende veen. Zuurstofdiffusie is in (natte) klei lager dan in zand. Echter door uitdroging in de zomer gaat klei scheuren en kan er makkelijk zuurstof naar beneden worden getransporteerd. De dikte van het minerale dek speelt ook een rol. Er wordt dus verwacht dat deze factoren van invloed zijn op de oxidatiesnelheid van veen onder een mineraal dek.

Literatuur
Diverse onderzoeken wijzen erop dat de totale hoeveelheid bodemdaling door veenoxidatie in aanwezigheid van een kleidek vooral wordt beperkt door het feit dat het kleidek zelf niet (of nauwelijks) oxideert (o.a. Van den Akker e.a. 2007). Er zijn uit de literatuur echter geen aanwijzingen dat het onderliggende veen minder bijdraagt (in vergelijking met wanneer het kleidek niet aanwezig is). Goede info over de invloed van het zuurstoftransport van een mineraaldek op de oxidatiesnelheid ontbreekt. Voor*prognose 2023* voor Flevoland is daarom geen ruimtelijke differentiatie in de oxidatiesnelheid α toegepast in verband met het minerale dek.

Kartering veraard veen in relatie tot het minerale dek
Op basis van beschikbare boorbeschrijvingen van de bodemkaart is de begindiepte waarop veraard veen wordt beschreven gekarteerd en vergeleken met de dikte van het minerale dek. (Figuur 28).
Daaruit wordt het volgende opgemaakt:

- Tot ca. 80 cm biedt het mineraal dek weinig tot geen bescherming tegen oxidatie. Dit houdt waarschijnlijk verband met het feit dat de veelal kleiige deklaag, mede door de sterke ontwatering, sterk is gescheurd waardoor zuurstof makkelijk tot grote diepte kan doordringen.
- Een uitzondering lijkt het gebied ten noordwesten van Emmeloord waar het minerale dek vrij dun is (de GLG over het algemeen dieper ligt dan 110 cm -mv) en desondanks vrijwel geen veraard veen wordt beschreven.

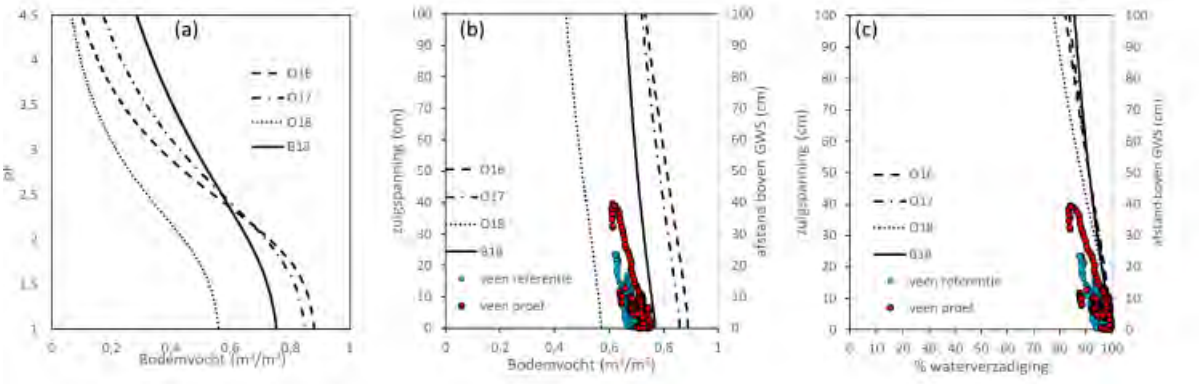


Figuur 28 Begindiepte veraard veen (op boorlocaties) geprojecteerd op de dikte van het minerale dek in Flevoland.

12.2.3 Hoogte boven de GLG zonder oxidatie

De parameter $H^0_{v,oxidatie}$ bepaalt tot welke hoogte boven de GLG geen oxidatie wordt berekend. De standaardwaarde van 0.3 m die wordt gebruikt in Atlantis is geschat op basis van correlaties van GLG- en langjarige bodemdalingsmetingen (door oxidatie) in Zegveld. Vergelijkbare metingen zijn niet beschikbaar voor Flevoland. Er is daarom gekeken welk inzicht kan worden verkregen uit (1) schattingen van water- en luchtgehalte van de bodem boven de grondwaterstand (GLG) en (2) de diepte tot waar veraard veen wordt aangetroffen in Flevoland in vergelijking met de GLG.

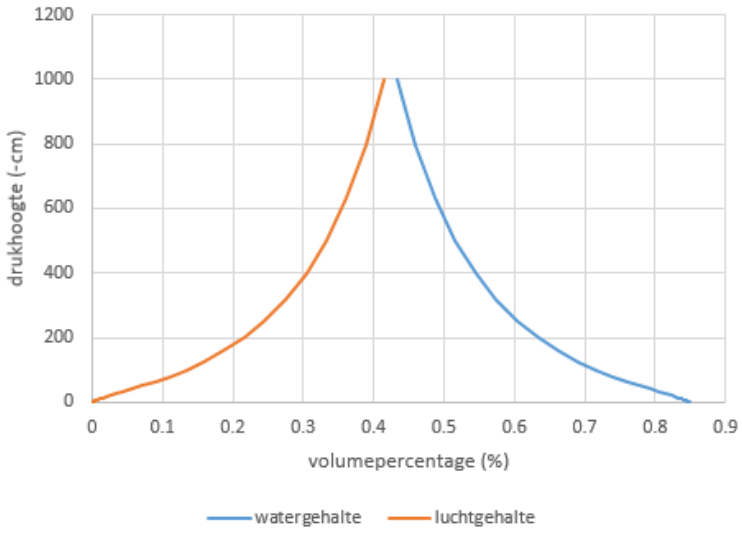
Water- en luchtgehalte van de bodem ten opzichte van de GLG
In het kader van het Spaarwater-project is door Acacia (2019) voor een klei op veenprofiel gemeten aan bodemvocht in relatie tot de afstand tot de grondwaterspiegel. Onder de aanname dat het profiel hydrostatisch is, kan de hoogte boven de grondwaterspiegel gelijkgesteld worden aan de zuigspanning (Figuur 29) en volgt dat de bodem op ca. 30 cm boven de grondwaterspiegel een waterverzadiging heeft van ca. 85 % (dit wordt dan de volcapillaire zone genoemd). Dit is deels te verklaren doordat de planten met name vocht onttrekken aan de topkleilaag en niet uit de onderliggende veenlaag.



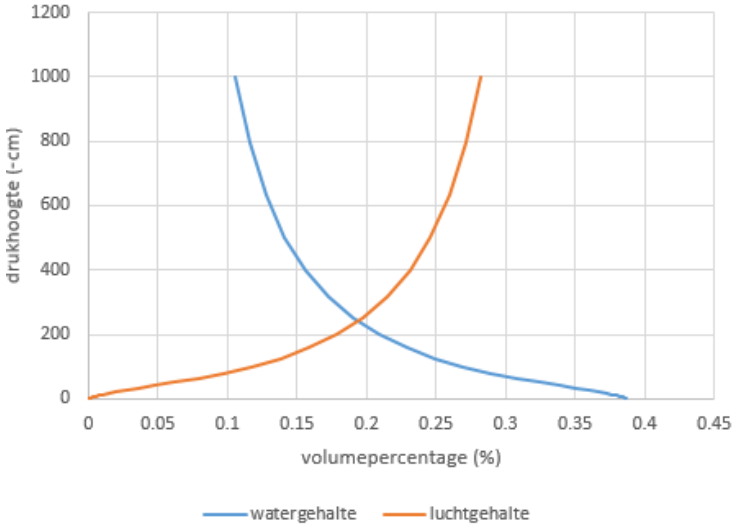
Figuur 29 Gemeten bodemvochtprofielen Spaarwater (Acacia, 2019)

Met behulp van de BOFEK-systematiek3 (https://www.wur.nl/nl/show/bodemfysische-eenhedenkaart-bofek2020.htm) kan worden bepaald welk gestandaardiseerde pF-curve past bij welk bodemprofiel. In Zegveld is dit de BOFEK-bouwsteen O17. Op basis van dat standaard profiel kan dan worden vastgesteld dat bij Zegveld er bij een drukhoogte van -30 cm 4 % lucht in het profiel voorkomt; bij – 70 cm is dat 10 % (Figuur 30).

Om een indicatie te krijgen of het lucht-/zuurstofprofiel sterk afhankelijk is van de bodemopbouw, is het verloop ook berekend voor een ander profiel uit Flevoland. Dit profiel (BOFEK-bouwsteen O2) bestaat uit een zandige toplaag met een moerige tussenlaag en daaronder een zwaklemig zand. Dit profiel geeft aan dat bij een luchtgehalte van 4 %, de drukhoogte ca. – 35 cm bedraagt (Figuur 31). Dit betekent dat dit profiel tot iets hoger in het profiel verzadigd is.



Figuur 30 Verloop lucht- en watergehalte Zegveld-profiel (O17)

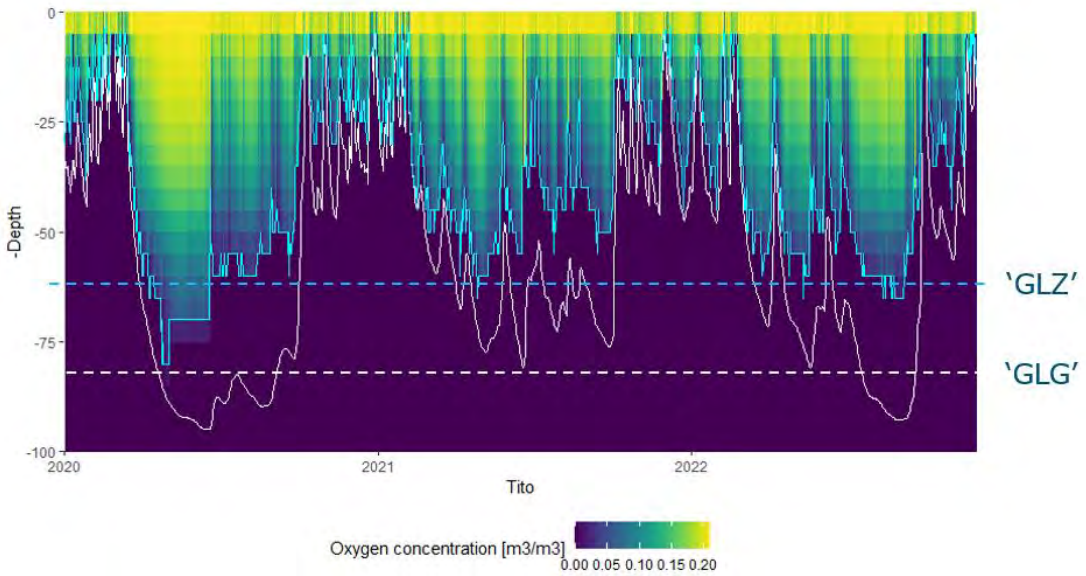


Figuur 31 Verloop lucht- en watergehalte Zandprofiel (O2)

In het bovenstaande rekenvoorbeeld is er op basis van Zegvelddata vanuit gegaan dat er geen oxidatie optreedt bij een luchtpercentage lager dan 4 %. Er is echter niet gemeten aan het daadwerkelijk luchtgehalte en of dit al dan niet oxidatie veroorzaakt. Stel dat de grens niet op 4 % maar op 2 % ligt dan daalt de drukhoogte voor het Zegveld-profiel tot – 15 cm. Dit betekent dat $H^0_{v,oxidatie}$ halveert en daarmee dus veel meer veen zou kunnen oxideren. Hierbij moet ook worden meegenomen dat in werkelijkheid de grondwaterstand in de zomerperiode tot onder de GLG (de drie laagste jaarlijkse grondwaterstanden gemiddeld over acht jaar) kan uitzakken waardoor het luchtgehalte op het betreffende niveau boven de GLG gedurende bepaalde perioden ook nog wat hoger kan zijn.

In het kader van het NOBV is op de locatie Vlist (klei op veen) gemeten aan de zuurstofconcentratie in het profiel. Hieruit blijkt dat de zuurstofconcentratie tot op ca. 25 cm boven de gemeten grondwaterstand nog vrijwel nul is (Figuur 32). Wel is te zien dat de grondwaterstand bij droge zomers tot onder de GLG kan zakken en dat daarmee ook de zuurstofgrens op bepaalde momenten veel dichter bij de GLG kan komen te liggen.

Op basis van indicatieve berekeningen lijkt er niet veel onderscheid te zijn tussen de dikte van de zone waarin de diverse profielen nog vrijwel volledig verzadigd zijn. Op basis van berekening en metingen lijkt een volcapillaire zone van 25/30 cm een redelijke inschatting. Gezien de onzekerheid m.b.t. een passende waarde voor $H^0_{v,oxidatie}$ is deze parameter meegenomen in de gevoeligheidsanalyse.



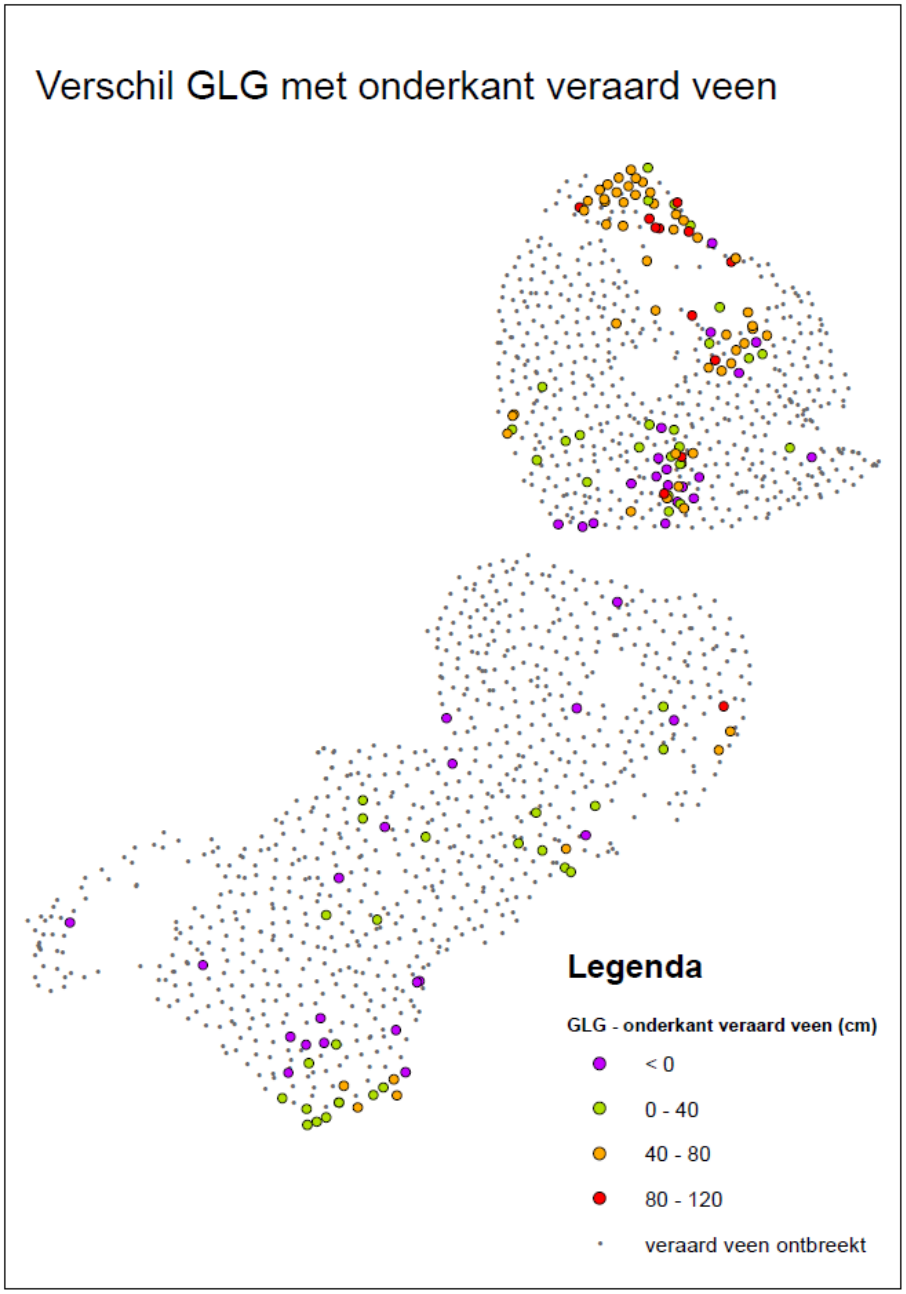
Figuur 32 Gemeten zuurstofconcentratie en grondwaterstanden en de GLG en GLZ (gemiddelde diepte waarop er geen zuurstof wordt aangetroffen) locatie Vlist (klei (40 cm) op veen). (bron: Wageningen Environmental Research, niet gepubliceerd)

Diepte van veraard veen in Flevoland t.o.v. de GLG

Op basis van beschikbare boorbeschrijvingen van de bodemkaart is een kaart gemaakt van de diepte tot waarop veraard veen wordt beschreven in de boringen en de GLG (Figuur 33). Daaruit wordt het volgende opgemaakt:

- Met name in Zuidelijke en Oostelijk Flevoland en rond Schokland wordt tot dicht (0-40 cm) boven de GLG veraard veen aangetroffen.
- Dit is minder zichtbaar voor de Noordoostpolder (NOP). In het noordelijke gedeelte van NOP houdt dit verband met het feit dat het veen alleen heel hoog in het profiel wordt aangetroffen en dus niet dieper veraard kan zijn. In het middendeel van de NOP zit de GLG relatief diep (> 150 cm), wat kan bijdragen aan een grotere afstand tussen GLG en de veraardingsdiepte (in Atlantis wordt een maximale diepte van oxidatie gehanteerd van 120 cm onder maaiveld, ongeacht GLG en $H^0_{v,oxidatie}$).
- De kaart levert indicaties dat $H^0_{v,oxidatie}$ kleiner dan 30 cm kan zijn.

Gezien de onzekerheid m.b.t. een passende waarde voor $H^0_{v,oxidatie}$ is deze parameter meegenomen in de gevoeligheidsanalyse.



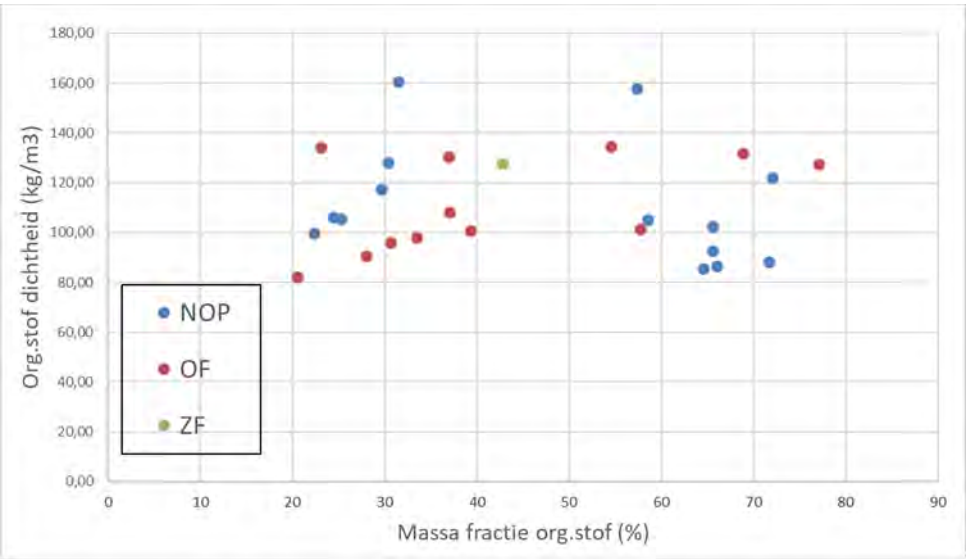
Figuur 33 Verschil tussen GLG en onderkant veraard veen in boorbeschrijvingen

12.2.4 Organische stofdichtheid veen

Analyses van veen gerapporteerd in het kader van*prognose 2012* (Grontmij rapport 2012; bijlagen 4 t/m 6) bevatten indirecte informatie over de organische stofdichtheid van veen in Flevoland. De tabellen bevatten data voor 28 locaties.
Eerst een selectie gemaakt van analyses met organisch stofgehalte > 20% waarvoor ook een bulk dichtheid bepaling aanwezig is zodat organische stofdichtheid berekend kan worden. Dit leverde resultaten op voor 9 locaties (4 in NOP, 4 in OF en 1 in ZF). De organische stofdichtheidsbepalingen zijn weergegeven Figuur 34 ten opzichte van het organisch stofgehalte. Uit deze beperkte data wordt het volgende opgemaakt:

- De spreiding van de dichtheid is zeer vergelijkbaar met die van de bredere nationale dataset van Erkens et al. (2016).

- Er is geen basis om ruimtelijk te differentiëren binnen Flevoland. Ook zijn er geen aanwijzingen voor een relatie met het bovengewicht (o.a. dikte minerale dek) of diepte onder maaiveld (analyse niet getoond).
- De standaardwaarde van 100 kg/m^3 die is gehanteerd in Atlantis is ook voor Flevoland een passende waarde.



Figuur 34 Organische stofdichtheid van veen in Flevoland als functie van het organisch stofgehalte.

12.3 Verwerking van de temperatuurontwikkeling in het klimaatscenario

Aangezien de afbraaksnelheid van organische materiaal (oxidatiesnelheid) gecorreleerd is met (bodem)temperatuur, zal een structurele stijging van de gemiddelde luchttemperatuur als gevolg van klimaatverandering ook de oxidatiesnelheid beïnvloeden. De oxidatiesnelheid (α) wordt in de prognoses daarom stapsgewijs gecorrigeerd voor de verwachte temperatuurstijging uit KNMI'14 scenario GL.

Hiervoor is gebruik gemaakt van de door Hendriks en Vermeulen (1997) ontwikkelde empirische relatie tussen de oxidatiesnelheid van organisch materiaal in Nederlandse veenbodems en de (lucht)temperatuur op basis van laboratoriumexperimenten. De empirische vergelijking toont een exponentiële ontwikkeling van de CO_2-uitstoot met de (lucht)temperatuur: De relatieve oxidatiesnelheid : $k_{rel} = 0.264\ e^{0.127T}$; hierin is T de bodetemperatuur.

Een aantal relevante beperkingen van de studie van Hendriks en Vermeulen zijn:

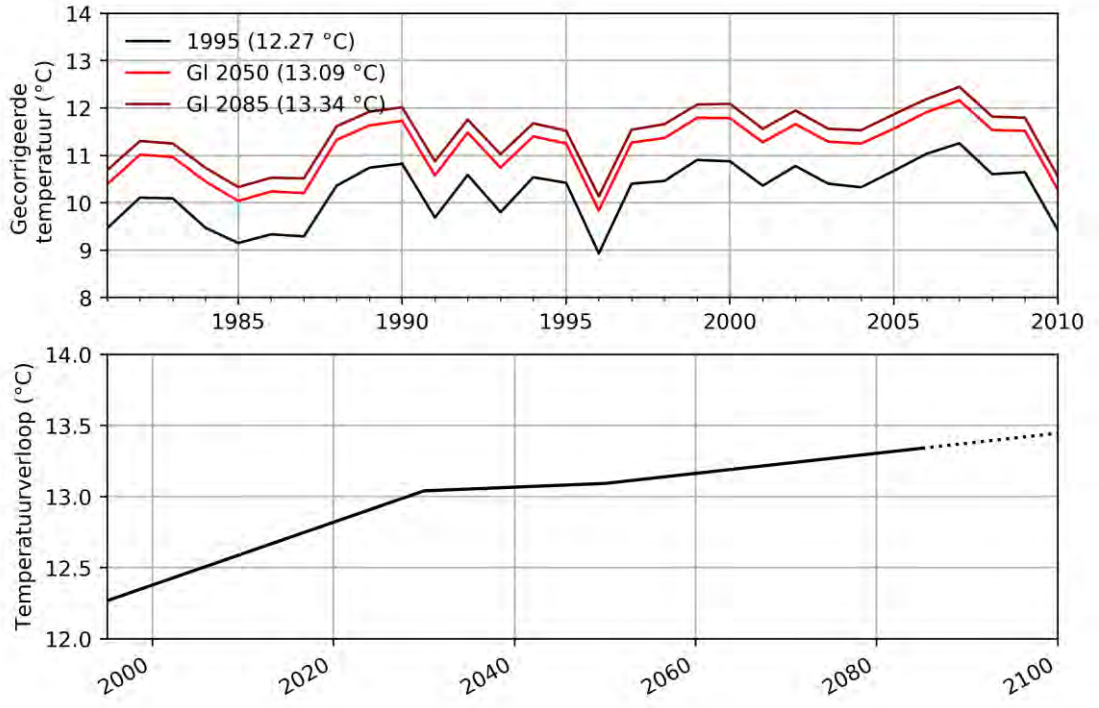
- De monsters zijn enkel blootgesteld aan 6 verschillende temperaturen (19,5; 10,5; 5,5; 3,2; 1,7 en 0°C) in een gecontroleerde opstelling. Dit betekent dat het toepasbaarheidsbereik van de relatie tussen 0°C en 19,5°C ligt.
- De empirische vergelijking is gebaseerd op 8 veenmonsters van verschillende dieptes afkomstig van drie locaties in Nederland. De studie heeft dus een beperkte dekking, maar voor de bodemdalingsvoorspellingen is aangenomen dat de vergelijking toepasbaar is op alle organische gronden in Flevoland.

Idealiter wordt de mutatiefactor voor de oxidatiesnelheid berekend op basis van gecorrigeerde bodemtemperatuurreeksen voor toekomstige klimaatomstandigheden. Dergelijke gecorrigeerde temperatuurreeksen zijn echter enkel beschikbaar voor luchttemperatuur en zijn samengesteld door het KNMI op basis van historische

temperatuurreeksen voor alle KNMI '14 klimaatscenario's voor zichtjaren 2050 en 2085. Aangezien een structurele stijging van de gemiddelde luchttemperatuur als gevolg van klimaatverandering zonder demping overgebracht wordt op de bodem, is het voldoende om met deze getransformeerde luchttemperatuurreeksen te werken.

Conform de voorspelde opwarming neemt de oxidatiesnelheid geleidelijk (niet-lineair) toe in de tijd. In Atlantis is het mogelijk om per jaar een gemiddelde luchttemperatuur te definiëren, waarmee de oxidatiesnelheid wordt aangepast. Aangezien de relatie tussen temperatuur en oxidatiesnelheid niet lineair is (in de zomer vindt exponentieel meer afbraak plaats dan in de winter), is de jaargemiddelde temperatuur hiervoor gecorrigeerd met behulp van de relatie van Hendriks en Vermeulen (1997). Hierbij zijn luchttemperaturen onder de 0°C en boven de 20°C afgekapt, omdat verwacht wordt dat de bodem niet dermate sterk zal afkoelen of opwarmen. Daarnaast vallen de temperaturen zo in het toepassingsbereik van de empirische formule. Figuur 35 laat deze gecorrigeerde luchttemperatuur zien voor het klimaat in 1995, 2050 en 2085. In de legenda is de klimaatgemiddelde gecorrigeerde temperatuur aangegeven.

De gekalibreerde oxidatiesnelheid (α) die door van den Akker (2007) is gevonden (zie paragraaf 12.1) wordt representatief geacht voor het referentieklimaat rond 1995 (relatieve oxidatiesnelheid is 1) en komt overeen met een gemiddeld gecorrigeerde temperatuur van 12.27 °C. In Figuur 35 is het verdere verloop van de gecorrigeerde toekomst op basis van KNMI'14 Gl-scenario aangegeven, Tabel 9 toont de bijbehorende relatieve oxidatiesnelheid t.o.v. 1995. Aangezien de KNMI'14 voorspellingen tot 2085 lopen, is de opwarmende trend lineair geëxtrapoleerd tot 2100.



Figuur 35: bovenste paneel: voor seizoensgebonden gecorrigeerde luchttemperatuur voor het klimaat rond 1995, 2050 en 2085 op basis van KNMI'14 Gl-scenario. Onderste paneel: verwacht verloop van gecorrigeerde luchttemperatuur op basis van KNMI'14. Aangezien de KNMI'14 voorspellingen tot 2085 lopen, is de opwarmende trend lineair geëxtrapoleerd tot 2100 (stippellijn).

Tabel 9: voor seizoensgebonden gecorrigeerde luchttemperatuur en relatieve oxidatiesnelheid t.o.v. 1995 voor het klimaat rond 1995, 2020, 2030, 2050, 2085 en 2100.

Jaar	Gecorrigeerde temperatuur ($^{\circ}C$)	Relatieve oxidatiesnelheid (-)
1995	12.27	1.00
2020	12.82	1.07
2030	13.04	1.10
2050	13.09	1.11
2085	13.34	1.15
2100	13.45	1.16

13 Rekenwijze compactie

De bestaande rekenwijze in Atlantis voor compactie is gebruikt (Erkens e.a., 2021). De methode maakt gebruik van het isotachenmodel – dit is het huidige standaard samendrukkingsmodel voor zettingsberekeningen in de geotechniek.

Het isotachenmodel gebruikt drie samendrukkingsparameters (*a*,*b*,*c*). Aan elke grondsoort (lithoklassen: klei, veen, zand, leem) die in het ondergrondmodel (Hoofdstuk 8) worden representatieve waarden voor deze parameters toegekend. Daarnaast wordt aan elke grondsoort een waarde voor de overconsolidatie ratio (OCR) toegekend. De combinatie van de vier parameterwaarden bepaalt niet alleen de compactiegevoeligheid voor spanningsveranderingen (verandering effectieve druk) in de bodem, maar bepaalt ook de initiële compactiesnelheid. De compactie bij constante spanningstoestand wordt kruip genoemd.
In de huidige toepassing komen spanningsveranderingen in de bodem alleen tot stand door verandering van het grondwaterpeil (GLG) ten opzichte van het bodemmateriaal.
Omdat gekozen is voor een vast streefpeil zijn deze veranderingen gering (maar niet nul).

14 GLG

14.1 Startconditie

De GLG-kaart is betrokken uit het meest recente Model Grondwaterspiegeldiepte (Water table Depth Model, WDM), dat deel uitmaakt van de BasisRegistratie Ondergrond (BRO). Het WDM omvat actuele kaarten van de karakteristieken GHG, GLG en Gt van de grondwaterspiegeldiepte in Flevoland en kwantitatieve informatie over de nauwkeurigheid van deze kaarten. ‘Actueel’ betekent in deze context dat de kaarten de langjarig gemiddelde grondwaterspiegeldiepte weergeven, gegeven de huidige hydrologische en klimatologische condities.

Voor de actualisatie van het WDM in Flevoland (Walvoort e.a., 2023) is gekozen voor een steekproefopzet die aansluit bij de spatial-coverage-steekproef, die werd uitgevoerd voor de actualisatie van de bodemkaart van dit gebied (Brouwer e.a., 2018). Het gebied betrof de Noordoostpolder en Oost- en Zuid-Flevoland. Aan 206 punten met geoptimaliseerde ruimtelijke spreiding (spatial coverage) zijn 40 punten toegevoegd om informatie te krijgen over variatie in GxG op kortere afstanden. Het totaal aantal locaties waar gerichte opnamen van de GHG en GLG hebben plaatsgevonden bedroeg 246. Op deze zogenoemde ‘gerichte-opnamelocaties’ zijn metingen van de grondwaterspiegeldiepte verricht in de periode dat de GHG en GLG voorkomen. Het veldwerk voor de bodem- en grondwaterkarteringen vond in 2018 plaats. Hoewel delen van 2018 zeer droog waren en een lage grondwaterspiegel werd gemeten heeft dit geen invloed gehad op de berekende GLG en GHG. Dit doordat de gemeten grondwaterspiegel in de boringen werden gecorreleerd aan de langjarige metingen in diverse peilbuizen; dit wordt stambuisregressie genoemd.

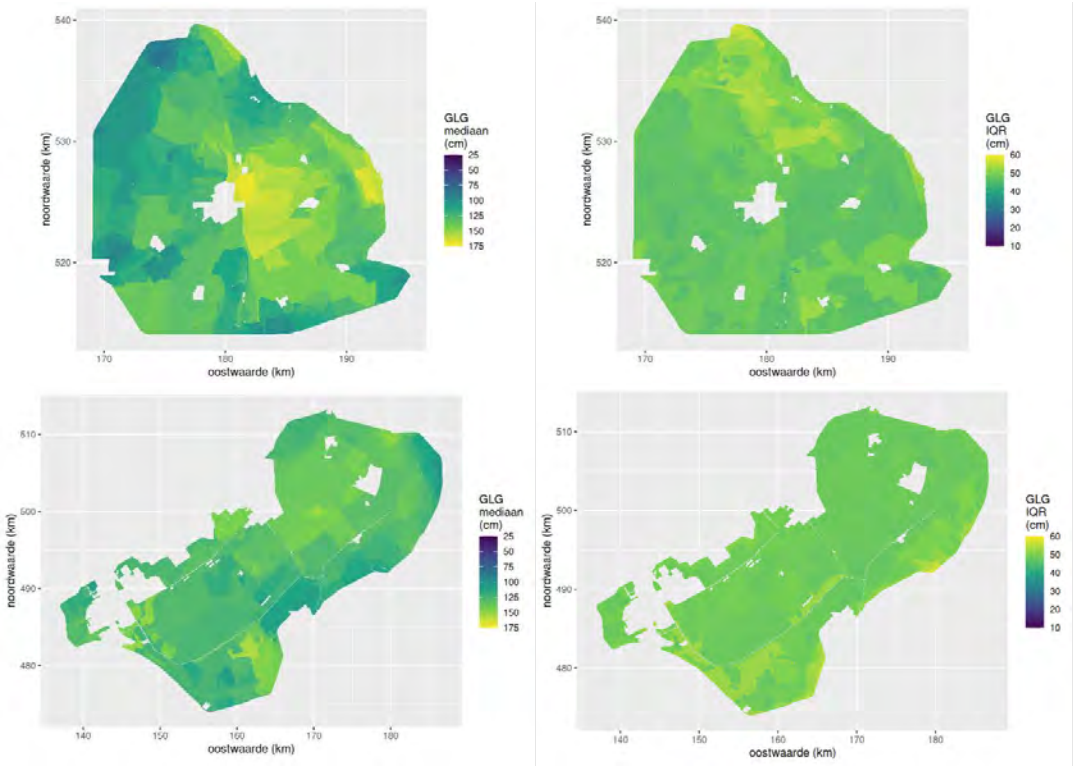
Na een controle van de peilbuisgegevens die door het waterschap Zuiderzeeland waren verstrekt op een aantal kwaliteitskenmerken, zijn de gegevens van 60 peilbuizen bruikbaar bevonden voor dit onderzoek. Voor de locaties van de 60 peilbuizen is de relatie vastgesteld tussen GHG’s en GLG’s enerzijds, en grondwaterspiegeldiepten ten tijde van de gerichte opnamen anderzijds. Deze relatie is gebruikt om op gerichte-opnamelocaties GHG’s en GLG’s uit gemeten grondwaterspiegeldiepten te berekenen. Bij deze zogeheten stambuisregressie is rekening gehouden met de aanwezigheid van ‘dieper-dan’ of gecensureerde waarnemingen, door niet-parametrische regressiemodellen te gebruiken. De GHG en GLG op een gerichte-opnamelocatie is vervolgens berekend met de mediaan uit de verdeling die gesimuleerd is met een niet-parametrisch regressiemodel.

Naast de GxG’s die uit tijdreeksen zijn berekend voor de peilbuislocaties en de GxG’s die met behulp van stambuisregressie zijn berekend voor de gerichte-opnamelocaties, beschikten we over 1272 veldschattingen van GxG’s op boorlocaties van de actualisatie van de bodemkaart (opname in 2017). Deze veldschattingen zijn gebaseerd op hydromorfe kenmerken in het bodemprofiel.

De verzamelde data zijn verwerkt tot kaarten van de GxG met behulp van geostatistische modellering. De simulaties werden voor alle gridcellen binnen een homogeen verondersteld deelgebied (stratum) samengevoegd om de ruimtelijke cumulatieve verdeling van GxG’s van dat deelgebied te berekenen. Voor deze aanpak is gekozen omdat in peilbeheerste gebieden veel variatie in grondwaterspiegeldiepte zich binnen percelen afspeelt, als gevolg van opbolling en uitzakking van de grondwaterspiegel. Daarom is gekozen deelgebieden (strata) te onderscheiden waarvan we veronderstellen dat de percelen vergelijkbare ontwatering

hebben, dus gebieden met weinig variatie tussen percelen en vergelijkbare variaties binnen percelen.

Het onderzoek heeft voor dit studiegebied onder meer een GLG-kaart voor vlakken met homogene perceelsontwatering opgeleverd. Deze GLG-kaart geeft de mediaan weer van de ruimtelijke cumulatieve verdeling van GLG's die voor elk van de strata is berekend (Figuur 36). De interkwartielafstanden geven een indruk van de ruimtelijke variatie en nauwkeurigheid binnen de vlakken.



Figuur 36 Mediane GLG (links) en interkwartielafstand van GLG's (rechts) binnen strata met homogene perceelsontwatering, (Walvoort e.a., 2023)

14.2 Ontwikkeling van GLG in de tijd

Naast een startconditie voor de GLG moeten keuzes worden gemaakt hoe de GLG zich vervolgens ontwikkelt in de tijd. Daarvoor zijn twee invloeden beschouwd: (1) van het KNMI'14 GL-scenario (uitgangspunt 3 in hoofdstuk 2); (2) van bodemdaling.
Omdat gekozen is voor een vast streefpeil, zijn invloeden van peilverandering (peilindexatie voor bodemdaling of anders) buiten beschouwing gelaten in *prognose 2023*.

14.2.1 Aanpak verwerking klimaatscenario

In bodemdalingsprognoseberekeningen met Atlantis wordt voor de invloed van klimaat op grondwaterpeilen gebruik gemaakt van beschikbare modelstudies – in principe zijn dit studies met het landelijk hydrologisch instrumentarium (LHM, voorheen NHI) - die de invloed van de klimaatscenario's op de GLG kwantificeren. Merk op dat de invloed van toenemende perioden van droogte daarin dan zijn verwerkt. Voor het huidige project was hiervoor de GLG-verandering beschikbaar die is berekend voor de Deltascenario's ten behoeve van de

Basisprognose 2018 – zoetwater (Hunink e.a., 2018). Er is in de Basisprognose 2018 onder andere een voorspelling gemaakt voor het *Deltascenario Rust*. Dit Deltascenario bevat het voor de huidige prognose gewenste GL-klimaatscenario (KNMI'14). Nadeel van deze beschikbare studie is echter dat het tevens bijdragen heeft van een 'beperkte' socio-economische ontwikkeling[17]. Deze extra invloeden zijn ongewenst voor de prognose voor Flevoland en impliceren dat er eerst nieuwe berekeningen met LHM gedaan zouden moeten worden. Daarbij komt dat het KNMI werkt aan een update van de klimaatscenario's waardoor de KNMI'14 scenario's spoedig verouderd zullen zijn. Inspectie van de studie laat verder zien dat de bijdrage van het klimaatscenario op de GLG, zonder socio-economische invloeden, waarschijnlijk zeer gering is in Flevoland.
In overleg met de opdrachtgever is daarom besloten om:

- Géén verandering GLG voor klimaatverandering toe te passen in de productie van de nieuwe prognosekaart[18].
- Dit te verschuiven naar een update (aanvullende opdracht) waarin het geüpdatete GL klimaatscenario wordt gebruikt en daarmee eerst een LHM modellering wordt gedaan.

14.2.2 Aanpak verwerking maaivelddaling

Er is besloten om voor de basiskaart het uitgangspunt te hanteren dat de GLG ten opzichte van NAP zakt met 50% van de daling van het maaiveld en dit percentage te variëren in de gevoeligheidsanalyse.
Deze keuze berust vrijwel volledig op algemene hydrologische systeemkennis; er bestaan geen directe waarnemingen voor de invloed van maaivelddaling op de GLG. Overwegingen:

- De verwachting dat de freatische grondwaterstand in Flevoland maar ten dele wordt bepaald door het oppervlaktewaterpeil, o.a. doordat de landbouwpercelen over het algemeen groot zijn. In droge perioden die relevant zijn voor de GLG is de verdampingsvraag sterk bepalend voor de mate van uitzakking van het freatisch niveau; het lokaal beschikbare vocht verdwijnt naar de atmosfeer. Beperking van de uitzakking door laterale aanvulling vanuit oppervlaktewater (en daarmee koppeling aan het oppervlaktewaterpeil) speelt alleen een rol dicht bij watergangen. Beperking van uitzakking door kwel vanuit het 1^{e} WVP speelt deels een rol, maar de stijghoogte in het 1^{e} WVP wordt niet 100% op peil gehouden vanuit het oppervlaktewater. De stijghoogte zakt deels mee met het freatisch niveau. Bij een lager maaiveld start de vochtuitputting door verdamping van een lager niveau t.o.v. NAP en kan de grondwaterstand ook iets verder uitzakken t.o.v. NAP.
- De extreme situaties zijn dat de GLG niet wordt beïnvloed door maaivelddaling (0%) en dat de GLG volledig meedaalt met de maaivelddaling (100%). Er is op dit moment geen evidente methode om het percentage te schatten. Een gemiddelde waarde wordt daarom passend geacht.

In de uitvoering is ervoor gekozen om de GLG mee te laten dalen met de gemiddelde bodemdaling van het perceel waar de bodemkolom zich in bevindt. Alleen voor locaties die buiten geregistreerde percelen liggen is uitgegaan van de bodemdaling voor de locatie van de bodemkolom.

---

[17] Landgebruik, maaiveld en peilverlaging voor bodemdaling (op basis voorgaande nationale kaart), onderwaterdrainage, reductie drinkwateronttrekking uit grondwater (-10%), reductie industriële grondwateronttrekking (-40%) (alleen voor onttrekkingen > 100.000 m3/jr; waarschijnlijk niet in Flevoland), aangepaste distributie beregeningslocaties (areaal +8%).
[18] De invloed van temperatuurverandering op de oxidatiesnelheid is toegelicht in 12.3.

15 Startparametrisatie

Om de bodemdalingsberekeningen te kunnen doen moet waarden worden toegekend aan alle benodigde parameters. In dit hoofdstuk wordt de eerste parametrisatie die is gebruikt toegelicht. Dit wordt verder de ‘startparametrisatie’ genoemd. De definitieve parametrisatie die is gebruikt voor de prognose (hoofdstuk 17), bevat een aantal wijzigingen ten opzichte van deze eerste parametrisatie. De definitieve parametrisatie is vastgesteld op basis van de gevoeligheidsanalyse (hoofdstuk **Error! Reference source not found.**) . Voor de betekenis van de verschillende parameters wordt verwezen naar de beschrijving van rekenwijzen van de verschillende processen.

15.1 Parameterwaarden op basis van ruimtelijke kartering

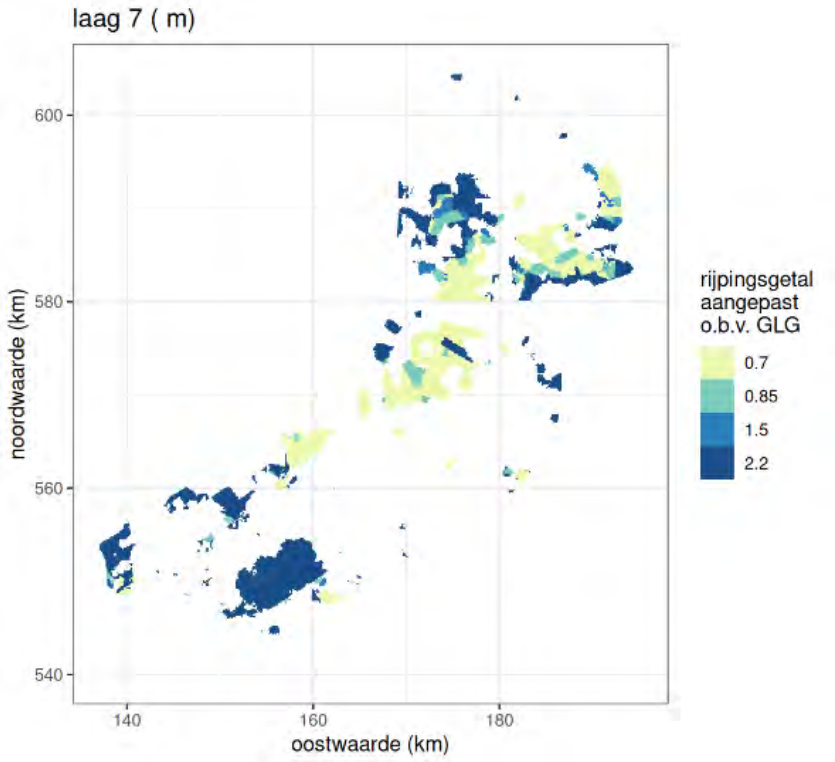
Deze parametrisatie is opgenomen in het voxelmodel van de ondergrond (zie paragraaf 8.3) en betreft de parameters rijpingsgetal (n), lutumgehalte (L), en organische stofgehalte (H). Kaartbeelden voor het lutumgehalte en organische stofgehalte zijn opgenomen in bijlage 19E.

De parametrisatie voor de rijpingsgraad in het voxelmodel betrof de rijpingsklassen 0 t/m 5. Deze klassen zijn omgezet naar rijpingsgetal n met Tabel 10.

Tabel 10 parametrisatie van n-waarden in het voxelmodel

rijpingsklasse	n-waarde
5	0,7
4	0,85
1-3	1,5
1	2,2
0	0

Figuur 37 toont het rijpingsgetal op 1,3 m -mv.



Figuur 37 Rijpingsgetal op 1,3 m -mv aangepast o.b.v. de GLG

15.2 Parameterwaarden gekoppeld aan lithoklassen en ruimtelijk uniforme parameterwaarden

Voor oxidatie en compactie zijn de parameterwaarden de standaardwaarden die zijn gebruikt voor de nationale bodemdalingsvoorspellingskaarten. Voor rijping betreft het vanzelfsprekend een nieuwe set van waarden, omdat het gaat om een nieuw ontwikkelde rekenwijze.

Tabel 11 Startparametrisatie rekenwijze rijping

	Tijdschaal	Boven GLG geen rijping	constante	Dichtheid				Anisotropie-factor
[-]	[jaar]	[m]	[-]	[kg/m^3]				[-]
$n_{gerijpt}$	τ	$H^0_{v,rijping}$	b	ρ_w	ρ_L	ρ_H	ρ_R	r
0,5	60	0	3	1000	2500	1470	2650	3

Aanvullend wordt in de rijpingsberekeningen gebruik gemaakt van de ruimtelijk gedifferentieerde parametrisatie in het ondergrondmodel voor rijpingsgetal n, lutumgehalte L en humusgetal/-gehalte H (paragraaf 15.1).

Tabel 12 Startparametrisatie rekenwijze oxidatie

Oxidatiesnelheid	Boven GLG geen oxidatie	Dichtheid schoon veen
[kg/m^3/d]	[m]	[kg/m^3]
α	$H^0_{v,oxidatie}$	ρ^{max}_{org}
4.603 x 10^{-3}	0,3	100

Aanvullend wordt in de oxidatieberekeningen gebruik gemaakt van de ruimtelijk gedifferentieerde parametrisatie in het ondergrondmodel voor humusgetal/-gehalte H (paragraaf 15.1).

Tabel 13 Startparametrisatie rekenwijze compactie

	Initieel volumiek gewicht	Isotache parameters				Consolidatiecoëfficient	Overconsolidatie ratio
	[kN/m^3]	[-]	[-]	[-]		[m^2/s]	[-]
	γ_{verz} / γ_{onverz}	a	b	c		c_v	OCR
zand	19,0 / 17,0	0,0001	0,0023	0		1,00E+00	1,25
klei	17,0 / 16,0	0,005	0,065	0,003		3,00E-08	1,56
veen	10,5 / 3,5	0,017	0,13	0,009		8,00E-08	2,23
‘leem’	19,0 / 17,5	0,002	0,03	0,0008		4,00E-08	1,25

γ_{water} = 9.81 kN/m^3

In Tabel 13 is de OCR-waarde voor zowel klei als voor veen zo gekozen dat een acht meter dikke laag van hetzij klei, hetzij veen (of een combinatie daarvan), bij aanvang een bodemdaling door kruip geeft van ca. 1 mm/jaar. Voor ‘leem’ is dat een ca. 0,25 mm/jaar en voor zand nihil.

Tabel 14 Startparametrisatie algemeen

GLG	%GLGmv#
WDM model	50%

percentage waarmee het GLG peil meezakt met maaivelddaling (14.2.2)

15.3 Tijdsdiscretisatie

De tijdsdiscretisatie betreft stress perioden en tijdstappen (Hoofdstuk 6). Er is gekozen voor stress perioden van 1 jaar. Dit zorgt ervoor dat de verlaging van het GLG peil, die is gekoppeld aan de maaivelddaling middels %GLGmv, regelmatig wordt verwerkt. Binnen elke stress periode wordt gestart met 1 dag, en deze tijdstap verdubbelt zich elke nieuwe tijdstap, waarbij de laatste tijdstap het jaar vol maakt.

16 Gevoeligheidsanalyse

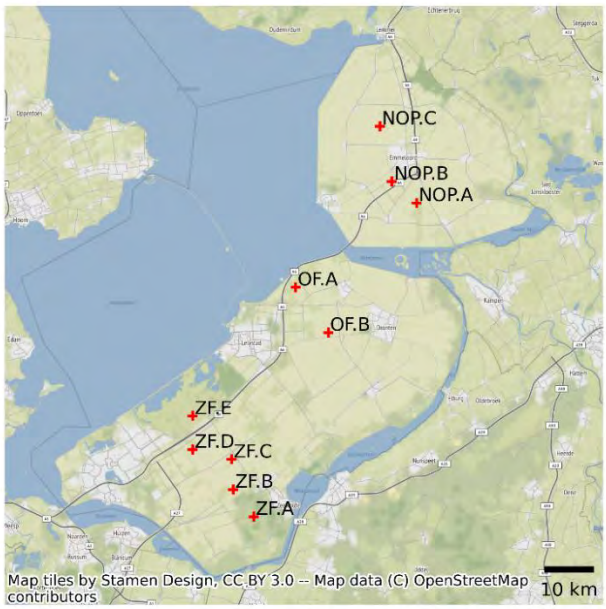
Als eerste stap in fase 2 is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Het doel van de gevoeligheidsanalyse is vierledig:

- Te bepalen of er aspecten van de gekozen rekenwijzen zijn die te weinig toegevoegde waarde hebben en beter kunnen worden weggelaten of vereenvoudigd. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse leverden daar geen aanleiding toe.
- Te onderkennen welke parameters/onderdelen veel invloed hebben en sterk bijdragen aan onzekerheid. Deze parameters worden besproken in paragraaf 16.3.2.
- Informatie te leveren voor bepaling van de definitieve parametrisatie voor de basisprognosekaart (beste schatting). De definitieve parametrisatie wordt besproken in hoofdstuk 17.
- Informatie te leveren voor de bepaling van de parametrisatie voor de twee andere kaarten – een hoge en een lage bodemdalingsprognose – die de onzekerheid/bandbreedte van de prognose in beeld brengen. De parametrisatie van deze kaarten wordt ook besproken in hoofdstuk 17.

De gevoeligheidsanalyse is gedaan op een selectie van kolommen uit het voxelmodel.

16.1 Geselecteerde locaties

Er zijn 10 locaties gebruikt in de gevoeligheidsanalyse, verdeeld over de drie polders (Figuur 38; Tabel 15). De locaties vertegenwoordigen verschillen in de bodemopbouw (deklaagdikte, veendikte en dikte van het totale Holocene pakket) en verschillen in GLG -mv. ZF.C is gekozen op een locatie waarin een minder gerijpte deklaag aanwezig is. Een deel van de locaties is gekozen waar relatief sterkere bodemdaling verondersteld wordt plaats te vinden (centrale deel van ZF en ten noorden van Schokland). Waar de gekozen locatie op minder dan 1,5 km afstand van een voormalig rijpingsterrein ligt is de naam van het betreffende rijpingsterrein aangegeven in Tabel 15.



Figuur 38 Locaties van de bodemkolommen die zijn gebruikt in de gevoeligheidsanalyse.

Tabel 15 Locaties gebruik in de gevoeligheidsanalyse

naam	X (RD; m)	Y (RD; m)	Nabijgelegen rijpingsterrein
ZF.A	161250.0	481050.0	ZF9
ZF.B	158750.0	484350.0	ZF14
ZF.C	158550.0	488050.0	-
ZF.D	153750.0	489250.0	ZF31
ZF.E	153750.0	493350.0	ZF34
OF.A	166350.0	509050.0	OF33
OF.B	170350.0	503550.0	OF32
NOP.A	181050.0	519350.0	-
NOP.B	178050.0	521950.0	-
NOP.C	176650.0	528650.0	-

16.2 Variatie parameterwaarden in gevoeligheidsanalyse

De startparametrisatie (Hoofdstuk 15) geeft het vertrekpunt voor de gevoeligheidsanalyse. Deze parametrisatie levert voor elk van de 10 locaties een bodemdalingsprognose op. In de gevoeligheidsanalyse zijn voor individuele parameters hogere dan wel lagere waarden gekozen om in beeld te brengen hoe de prognose daardoor verandert. De linker kolom van Tabel 16 vermeldt de parameters die zijn betrokken in de gevoeligheidsanalyse. Het zijn de meest bepalende parameters voor de drie onderscheiden bodemdalingsprocessen. De startwaarden van deze parameters staan vermeld in de tweede kolom. De variaties die zijn toegepast staan in de kolommen ‘lager’ en ‘hoger’.

Tabel 16 Variaties (hoger/lager) die zijn toegepast in de gevoeligheidsanalyse in vergelijking met de startwaarde. De rechterkolom geeft aan of een absolute waarde (abs) of een verandering (ver) is vermeld in de kolommen ‘hoger’ en ‘lager’.

parameter	**startwaarde**	**lager**	**hoger**	
GLG	WDM model (p50)	-0,1 m -0,25 m -0,4 m	+0,1 m +0,25 m +0,4 m	ver
%GLGmv	50%	0%	100%	abs
$H^0_{v,oxidatie}$	0,3 m	0,05 m 0,2 m	0,4 m 0,55 m	abs
α	4,603 x 10^{-3} kg/m3/d	- 50%	+20%	ver
$\rho^{\max}_{org}$	100 kg/m3		150 kg/m3	abs
$H^0_{v,rijping}$	0,0 m		0,25 m	abs
n	Voxel parametrisatie	$n=n_{gerijpt}$ =0,5 boven GLG	=2,2 -0,5*(2,2-n)	abs
τ	60 jr	40 jr	80 jr	abs
r	3 (isotroop)	2 (tussen isotroop en verticaal)		abs
OCR	Levert 1 mm/jr voor 8 m klei/veen		20 mm/jr voor 8 m klei/veen	abs

16.3 Resultaten

De volledige resultaten voor de 10 locaties zijn opgenomen in bijlage 19D. In de bijlage worden de grafische resultaten voor vijf locaties toegelicht om de informatie daarin te kunnen

duiden. De onderstaande presentatie beperkt zich tot enkele statistieken en een bespreking van de resultaten.

16.3.1 Statistieken

Tabel 17 Enkele karakteristieken per locatie

	Startdaling ref. (mm/jaar)*	Daling 2100 ref. (m)	Bandbreedte# 2100 (m)
ZF.A	1	0,04	0,01 – 0,14
ZF.B	3	0,10	0,04 – 0,19
ZF.C	3	0,11	0,04 – 0,20
ZF.D	4	0,18	0,04 – 0,37
ZF.E	2	0,07	0,03 – 0,17
OF.A	< 1	0,03	0,03 – 0,08
OF.B	1	0,04	0,02 – 0,14
NOP.A	10	0,55	0,12 – 0,95
NOP.B	5	0,17	0,05 – 0,24
NOP.C	9	0,52	0,09 – 0,95

* berekende daling in het jaar 2020

aangegeven is de laagste en hoogste daling die is berekend voor de gekozen variaties

Tabel 18 maximaal individueel effect in 2100 > 0,1 m (t.o.v. basis)

	GLG	%GLGmv	$H^0_{v,oxidatie}$	α	ρ^{max}_{org}	$H^0_{v,rijp\,in\,g}$	n	τ	r	OCR
ZF.A							■			
ZF.B							■			
ZF.C	■									
ZF.D	■	■	■				■			
ZF.E							■			
OF.A										
OF.B							■			
NOP.A	■	■	■	■	■					
NOP.B	■		■				■			
NOP.C	■	■	■	■	■					

Tabel 19 maximaal individueel effect in 2100 > 0,2 m (t.o.v. basis)

	GLG	%GLGmv	$H^0_{v,oxidatie}$	α	ρ^{max}_{org}	$H^0_{v,rijp\,in\,g}$	n	τ	r	OCR
ZF.A										
ZF.B										
ZF.C										
ZF.D	■									
ZF.E										
OF.A										
OF.B										
NOP.A	■	■	■	■						
NOP.B										
NOP.C	■	■	■	■	■					

16.3.2 Bespreking

Gevoeligheid

De resultaten geven de volgende inzichten in de gevoeligheid :

- De parameters die het dieptebereik onder maaiveld bepalen waarbinnen oxidatie plaatsvindt (GLG, %GLGmv en $H^0_{v,oxidatie}$) hebben de grootste invloed. De invloed is vooral groot waar met de startparametrisatie al een grote bodemdalingsbijdrage door oxidatie wordt berekend. Deze bijdrage kan met aangepaste parametrisatie sterk worden onderdrukt of verder worden vergroot. Dit is bijvoorbeeld het geval op locaties NOP.A en NOP.C (zie de bandbreedte in Tabel 17).
- De invloed van %GLGmv is groot op bovengenoemde locaties omdat het bepaalt of het oxidatiebereik zich uitbreidt in dieper 'vers' veen en daarmee de bodemdaling door oxidatie 'in gang houdt' – dit is maximaal bij %GLGmv = 100% - of dat dit niet gebeurt, waardoor alleen het veen dat zich bij aanvang in het oxidatiebereik bevindt 'opbrandt' waardoor de bodemdaling door oxidatie sterk afneemt – bij %GLGmv = 0%.
- Waar een significante oxidatiebijdrage aanwezig is, is ook de gevoeligheid voor de andere parameters in de oxidatieberekening (α , ρ^{max}_{org}) relatief groot.
- Er zijn (vanzelfsprekend) ook locaties (gebiedsdelen in Flevoland) waar niet of nauwelijks gevoeligheid bestaat voor bovengenoemde parameters door afwezigheid van veen of veen op te grote diepte om binnen het (aerobe) oxidatiebereik te komen.
- De gevoeligheid voor de parameters in de rijpings- en compactie rekenwijze is minder groot dan die in de oxidatieberekening.
- De berekende invloed van het initiële rijpingsgetal (n) van de deklaag bedraagt maximaal anderhalve decimeter in 2100. Een invloed van meer dan één decimeter is voor veel locaties gevonden (Tabel 18). Dat komt doordat de vrijwel volledig gerijpte waarde n=0,7 die in de startparametrisatie is opgenomen, voor de hoge waarden is 'opgevoerd' naar een vrij hoge waarde van n=1,45. Dit zorgt ervoor dat in deze berekening ook zeer ondiepe bodemniveaus tot aan maaiveld een vrij grote restrijpiingsbijdrage leveren. Alleen waar het minerale dek erg dun is (NOP.A, NOP.C) bedraagt de berekende invloed minder dan een decimeter. Voor de minder gerijpte voxels is de n-waarde in de gevoeligheidsanalyse juist beperkter verhoogd. Daardoor is de gevoeligheid voor deze locaties daardoor juist wat onderschat, ook omdat in de startparametrisatie was gekozen voor isotrope krimp (r=3). Omdat de restrijping met name wat dieper onder maaiveld zal plaatsvinden is een wat sterkere verticale krimp (r=2) bij nader inzien realistischer.
- De gevoeligheid voor compactie (OCR) is beperkt tot minder dan een decimeter. Deze beperkte invloed wordt echter sterk bepaald door het feit dat voor de prognose een scenario met vast peil wordt gehanteerd. Voor scenario's waarin het peil, en met name de GLG, actief wordt verlaagd (verdieping van sloot- en buisdrainage), is de invloed van compactie aanzienlijk groter.
- In de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse is alleen onderzocht wat het gevolg is als één parameterwaarde tegelijk wordt aangepast. Er zijn echter logischerwijs parametercombinaties die een groter effect opleveren dan de individuele effecten tonen (het omgekeerde is ook het geval). Zo zullen een lager GLG peil en een lagere $H^0_{v,oxidatie}$ elkaar versterken. En de invloed van compactie (via een lage OCR) is groter naarmate de GLG sterker daalt ten opzichte van de onderliggende veen en kleilagen, bijvoorbeeld combinatie met een hoge %GLGmv. Het is relevant om dit te onderkennen. Een 'volledige' analyse van al deze mogelijke interacties is echter zeer omvangrijk, zal niet direct tot betere keuzes voor de parametrisatie van de prognose leiden, en is daarom achterwege gelaten. Hetzelfde geldt voor de gevoeligheid voor de onzekerheid in het gebruikte bodemprofiel.

17 Definitieve parametrisatie basiskaart en bandbreedtekaarten

17.1 Overwegingen voor de basiskaart

Om te komen tot de definitieve parametrisatie is de vraag gesteld of er redenen zijn om af te wijken van de startparametrisatie – dit was de beste a priori schatting (Hoofdstuk 15). Overwegingen die zijn beschouwd zijn (a) beperken van verschillen met *prognose 2012*, (b) afstemmen op 'bodemdalingsmetingen' (c) overwegingen naar aanleiding van de gevoeligheidsanalyse. Deze punten worden hieronder besproken.

Beperken van verschillen met de prognose 2012. De prognose voor de startparametrisatie voor de locaties die zijn doorgerekend in de gevoeligheidsanalyse geeft aan dat deze nieuwe prognose in verschillende gebiedsdelen grote verschillen geeft ten opzichte van *prognose 2012* (De Lange e.a., 2012). Met name in centrale delen van Zuidelijk Flevoland wordt met de startparametrisatie minder bodemdaling voorspeld in 2100 (0,1 a 0,2 m in plaats van 0,4 tot 0,6 m). Deze verschillen kunnen niet worden verklaard uit het latere startmoment van *prognose 2023* (2020 versus 2011). Deze verschillen bieden echter ook geen basis om de startparametrisatie voor de prognose aan te passen. Daarvoor zou (a) vast moeten staan dat *prognose 2012* een hoge betrouwbaarheid of nauwkeurigheid heeft, én (b) bekend moeten zijn welke processen *prognose 2012* bepalen (oxidatie, rijping, compactie). Aan beide wordt niet voldaan. De bandbreedte/onzekerheid van *prognose 2012* is niet bekend, maar ongetwijfeld hoog. En de onderliggende procesbijdragen (en validiteit daarvan) zijn niet bekend of te achterhalen.

Afstemmen op 'bodemdalingsmetingen'. Voor *prognose 2012* zijn de historische bodemdalingstrends van de rijpingsterreinen tot begin jaren '90 van de vorige eeuw gebruikt om het bodemdalingsmodel te 'kalibreren'[19]. Voor *prognose 2023*, waarin de modellering start bij de 'actuele' situatie, zijn voor een vergelijkbare exercitie 'actuele' bodemdalingssnelheidsschattingen nodig. De beste beschikbare schatting op dit moment is de maaivelddalingssnelheidskaart die is opgesteld met AHN-hoogte datasets (paragraaf 7.2). Gebruik van deze kaart voor kalibratie is echter verre van evident. Ten eerste is de geschatte fout (standaarddeviatie) in de snelheid is vergelijkbaar of groter dan de snelheid. Dat betekent dat de betrouwbaarheid/nauwkeurigheid van een gekalibreerd bodemdalingsmodel erg laag blijft. Ten tweede is de vraag welke parameters en processen (en in welke verhouding) geoptimaliseerd zouden moeten worden. Om redelijke overeenstemming met de ANH-gebaseerde snelheidskaart (beste schatting) te verkrijgen lijkt het noodzakelijk de parametrisatie verschillend aan te passen voor deelgebieden. Ten noordwesten van Emmeloord zou bijvoorbeeld naar parametrisatie moet worden gezocht die de bijdrage van oxidatie reduceert; in Zuidelijk Flevoland werkt dit 'averechts' of moeten andere procesbijdragen flink verhoogd. Zonder onderbouwing voor zulke verschillen is zo'n optimalisatie ongewenst. Er is simpelweg onvoldoende 'houvast' om een betekenisvolle kalibratie uit te voeren. Bovendien wordt er een ruime bandbreedte aan de prognose toegevoegd. Daardoor is de betekenis van gedetailleerde verschillen in de basiskaart sowieso beperkt. Er is daarom voor gekozen geen afstemming te doen op basis van de maaivelddalingssnelheidskaart.

[19] Dit is naar alle waarschijnlijkheid ook de belangrijkste verklaring voor de relatief hoge bodemdalingsprognose in delen van Zuidelijk Flevoland.

Overwegingen naar aanleiding van de gevoeligheidsanalyse. Bij de bespreking van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse (16.3.2) is geconstateerd het logischer is om voor de rijpingsberekeningen te kiezen voor anisotroop in plaats van isotroop volumeverlies (r=2 in plaats van r=3).

17.2 Overwegingen voor de bandbreedtekaarten

De beoogde bandbreedtekaarten bestaan uit een ‘prognose laag’ en een ‘prognose hoog’ kaart. Omdat er meerdere parameters, behorende bij verschillende processen, bij kunnen dragen aan een hogere prognose en aan een lagere prognose is ervoor gekozen om meerdere parameters tegelijk aan te passen, waarbij elke individuele aanpassing bijdraagt aan een lage dan wel hoge prognose, en daarbij ‘minder gevoelige parameters’ buiten beschouwing te laten. Wanneer meerdere (gevoelige) parameters tegelijk worden aangepast – de gevoeligheidsanalyse betrof variatie van individuele parameters – kan dat tot een extreme, zeer onwaarschijnlijke schatting leiden wanneer voor elk van de parameters een grote aanpassing wordt genomen (stapelingseffect). De individuele aanpassingen zijn daarom relatief gematigd gekozen. Ze zijn gebaseerd op expert judgement en de resultaten van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse. De hoge dalingsprognose levert een kaart waarvoor de kans dat deze de daling onderschat klein wordt geacht (deze kans is niet nauwkeurig te kwantificeren). Lokaal of in gebiedsdelen is onderschatting voor ‘prognose hoog’ daarmee dus niet uitgesloten. Onderschatting blijft ook mogelijk indien er processen ontbreken (b.v. anaerobe veenafbraak) .

17.3 Parametrisatie

Voor de definitieve parametrisatie worden de aanpassingen beschreven die daarin zijn gedaan ten opzichte van de startparametrisatie (Hoofdstuk 15). Alles wat niet wordt benoemd is dus ongewijzigd overgenomen voor de productie van de kaarten. De aanpassingen zijn samengevat in Tabel 20.

Tabel 20 Aanpassingen definitieve parametrisatie ten opzichte van de startparametrisatie (grijs: niet aangepast)

parameter	basisprognosekaart	Prognose hoog	Prognose laag
GLG	WDM model p50	p75	p25
%GLGmv	50%	66%	33%
$H^0_{v,oxidatie}$	0,3 m	0,2 m	0,4 m
n	startparametrisatie	Zie tekst	startparametrisatie
r	2	1	2
OCR	Levert 1 mm/jr voor 8 m klei/veen	Levert 20 mm/jr voor 8 m klei/veen	Levert 1 mm/jr voor 8 m klei/veen

Voor de basisprognose is alleen de anisotropiefactor r aangepast (van r=3 naar r=2). Voor ‘prognose hoog’ is voor de 75 percentiel GLG kaart van het WDM model gekozen. De mate waarin de GLG dieper is dan in de basisprognose (50 percentiel kaart) is daarmee ruimtelijk variabel en gebaseerd op de stochastiek van de meetdata van het WDM model. In verband met de diepere ligging van de initiële GLG is een hermodellering uitgevoerd voor het rijpingsgetal (n). Daarmee wordt voorkomen dat volledig ongerijpte voxels boven de diepere GLG komen te liggen en onrealistisch veel bijdragen aan bodemdaling. De n-waarden verkregen uit de hermodellering zijn voor ‘prognose hoog’ vervolgens nog verhoogd met 25%. Hierdoor leveren minder sterk gerijpte voxels een grotere bijdrage aan bodemdaling

door (rest)rijping. Voor ‘prognose laag’ is een hoger liggende GLG (p25) gebruikt. Voor die variant is gekozen om de oorspronkelijke parametrisatie van het rijpingsgetal te handhaven.

18 Referenties

Acacia, 2019. Spaarwater Flevoland 2019. Gouda

Bakema, G, van den Akker J.J.H. en van F. van Egmond, 2021. Voorkomen en opheffen van bodemverdichting; literatuuronderzoek en casestudie Flevoland Wageningen Environmental Research, Rapport 3069. 39 blz.; 16 fig.; 2 tab.; 55 ref.

Bogaert, P. 2002. Spatial prediction of categorical variables: the Bayesian maximum entropy approach. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 16, 425–448.

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

Brouwer, F. en M.M. van der Werff, 2012. Vergraven gronden: Inventarisatie van 'diepe' grondbewerkingen, ophogingen en afgravingen. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2336 26 blz.; 4 foto; .4. ref.

Brouwer, F., F. de Vries en D.J.J. Walvoort (2018). Basisregistratie Ondergrond (BRO); Actualisatie bodemkaart: herkartering van de bodem in Flevoland. Wageningen, WOT Natuur & Milieu, WUR. WOttechnical report 143. 52 blz.; 22 fig.; 4 tab.; 19 ref.

Christakos, G. 2000. Modern spatiotemporal geostatistics. Oxford University Press, New York.

De Vries F., D. Walvoort en F. Brouwer, 2017. Basisregistratie Ondergrond (BRO) Actualisatie bodemkaart; Herkartering van de eenheden met slappe kleilagen. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2834. 40 blz.; 12 fig.; 9 tab.; 14 ref.

De Lange, J., 2015. Analyse bodemdaling en zetting Almere. Deltares rapport 1210761-000-BGS-0005.

De Lange, G., J. Gunnink, Y. Houthuessen, R. Muntjewerf, 2012. Bodemdalingskaart Flevoland, Grontmij Rapport GM-0042778, revisie D2.

Ente, P.J., J. Koning en R. Koopstra, 1986. De bodem van oostelijk Flevoland, Flevobericht 258. Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders.

Erkens, G., P. de Louw, H. Bootsma, J. Stafleu, J. van den Akker, H. Kooi (2018) Huidig en toekomstig opbarstrisico in de provincie Zuid-Holland, Deltares rapport 11200024-000

Erkens, G., H. Kooi, R. Melman, 2021. Actualisatie bodemdalingsvoorspellingskaarten. Deltares rapport 11206724-002-BGS-0001.

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

Gerritsen, P., D.J.J. Walvoort, M. Knotters (2021). Kartering grondwaterspiegeldiepte in laag Friesland; Actualisatie van een deel van het grondwaterspiegeldieptemodel van de

Basisregistratie Ondergrond (BRO). Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-rapport 131. 50 blz.; 13 fig.; 1 tab.; 31 ref; 3 Bijlagen.

Gotjé, W. (2014). Catalogus van geologische kaarten van de Noordoostpolder. Gotjé Environmental Consultancy.

Gunnink, J., G. de Lange, J. van den Akker, P. Fokker, 2010. Kennisdocument bodemdaling. TNO rapport TNO-034-UT-2010-01962/A.

Gunnink, J.L., 2021. Deklaagweerstand Flevopolders. TNO-rapport, TNO 2021 R10844.

Hendriks, R., & Vemeulen, J. (1997). Effect of temperature on the decomposition of organic matter in Dutch peat soils. *Peat in horticulture - its use and sustainability*, 163-167.

Jongmans, A.G., M.W. van den Berg, M.P.W. Sonneveld, G.J.W.C. Peek en R.M. van den Berg van Saparoea, 2013. Landschappen van Nederland. Geologie, Bodem en Landgebruik. Wageningen Academic Publishers.

Journel, A. G., 1983, Nonparametric estimation of spatial distributions: Math. Geol., v. 15, no. 3, p. 445–468.

Kooi, H. (2018). Bodemdaling door grondwateronttrekking in het Westland en omgeving. Deltares Bodemdaling door grondwateronttrekking in het Westland en omgeving (deltares.nl)

Kooi, H., Bakr, M., de Lange, G., den Haan, E., and Erkens, G. (2018) User guide to SUB-CR; a MODFLOW package for land subsidence and aquifer system compaction that includes creep, Deltares internal report 11202275-008.

Kooi, H., G. Erkens, 2020. Modelling subsidence due to Holocene soft-sediment deformation in the Netherlands under dynamic water table conditions. Proc. IAHS, 382, 493–498, https://doi.org/10.5194/piahs-382-493-2020

Kooi, H., G. Bakema en J. Gunnink (2022) Voorstudie nieuwe bodemdalingsprognose Flevoland. Deltares rapport 11207704-002-BGS-0003.

Lambert, J.W.M., L. Niel, S. Stoorvogel-van der Horst, E. Verheijen, M. Woning, 2015. Bodemdaling Almere, consequenties voor gemeentelijke infrastructuur. Rapport TO2 federatie samenwerkende organisaties in toegepast onderzoek.

Menke, U., E. van der Laar en G. Lenselink, 1998. De geologie en de bodem van Zuidelijke Flevoland. Flevobericht 415. Rijkswaterstaat.

Muntjewerff, R., 2012. Verbeteringsmogelijkheden Bodemdalingskaart Flevoland. Memo Grontmij, kenmerk 304424.

Pons, L.J. en I.S. Zonneveld (1965**)** Soil ripening and soil classification; ILRI publ. no. 13, Wageningen

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.

Stuyt, L.C.P.M., M. Knotters, D.J.J. Walvoort, F. Brouwer & H.T.L. Massop (2018). Basisregistratie Ondergrond - Gd-kartering Laag-Nederland 2018; Provincie Flevoland. WOt-

technical report 145. WOT Natuur & Milieu, WUR, Wageningen. 86 blz.; 57 fig.; 7 tab.; 26 ref; 1 bijlage

Soares, A., 1992. Geostatistical estimation of multi-phase structure. Mathematical Geology 24: 149-160

ten Cate, J. A. M., A. F. van Holst, H. Kleijer, and J. Stolp. 1995. “Handleiding Bodemgeografisch Onderzoek; richtlijnen en voorschriften. Deel A: Bodem.” 19A. Wageningen: DLO-Staring Centrum.

Van den Akker, J.J.H., 2012. Notitie beoordeling bodemdalingsprognoses Flevoland 2011.

Van den Akker, J.J.H., H.T.L. Massop en R.P.J.J. Rietra, 2018. Potentiële emissiereductie broeikasgassen Fries veenweidegebied; Waterhuishoudkundige en bodembeheermaatregelen om broeikasgasemissies te beperken. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2905.

Van den Akker, J.J.H., R. Hendriks, J. Frissel, K. Oostindie en J. Wesseling, 2013. Gedrag van verdroogde kades; ontstaan en gevaar van krimpscheuren in klei- en veenkades. Alterra-rapport 2473. Wageningen.

Van den Akker, J.J.H., T. Hoogland en F. Stoppelenberg, 2011 Berging in kleischeuren in de Flevopolders. STROMINGEN 16 (2011), nummer 3.

Van den Akker, J.J.H., 2022. Mondelinge mededelingen.

Van Asselen, S., G. Erkens, E. Stouthamer, H.A.G. Woolderink, R.E.E. Geeraert, M.M. Hefting, 2018. The relative contribution of peat compaction and oxidation to subsidence in built-up areas in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands, Science of the Total Environment, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.141

Walvoort D.J.J., P. Gerritsen en M. Knotters, 2023. Kartering grondwaterspiegeldiepte in Flevoland; Actualisatie van een deel van het grondwaterspiegeldieptemodel van de Basisregistratie Ondergrond (BRO). Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-rapport 153.

Weidner, S., et al., 2023. Persoonlijke communicatie. Te publiceren in 2023 op www.nobveenweide.nl

Wiggers, 1955. De wording van het Noordoostpoldergebied. VAN ZEE TOT LAND Rapporten en mededelingen inzake de droogmaking, ontginning en sociaal-economische opbouw der IJsselmeerpolders, Nr 14

19 Bijlagen

A Digitale bijlagen

De digitale bijlage bevat de volgende mappen

A.1 Prognosekaarten_2023

A.2 Dalingstijdreeksen rijpingsterreinen_2023

A.3 Dalingstijdreeksen rijpingsterreinen_2023_incl_prognose

A.4 DalingssnelheidskaartAHN2,3,4

A.5 Voxelmodel_2023

B n-factor

De rijpingsfactor kan worden bepaald met vergelijking 1 (Pons en Zonneveld, 1965).

$n = (A - 0{,}2R))/(L + bH)$ (1)

n= rijpingsfactor (-)

A= watergehalte (g/100 g droge grond) aan verzadigde grond (vochtspanning = 0)

R = niet colloïdale minerale delen

L = lutumgehalte (g/100 g droge grond)

H = organische stofgehalte (g/100 g droge grond)

b = constante 3 = veraard veen, 6 = weinig verweerd veen

De rijpingsfactor n kan worden berekend (vergelijking 2) met in het lab bepaalde watergehalte (A), het lutumgehalte (L) en humusgehalte (H).

$A = \frac{\rho_w - \rho_{bd}}{\rho_{bd}} * 100$ (2)

ρ_{bd} = droge bulkdichtheid (kg/m^3)

ρ_w = bulkdichtheid bij volledige verzadiging (kg/m^3)

De rijpingsfactor kan ook worden geschat op basis van de consistentie van het sediment. Er is een indeling gemaakt naar de mate van rijping in 5 klassen (De Vries et al (2017) uit De Bakker en Schelling, 1989). Pas gesedimenteerd waterrijk bodemmateriaal is erg slap en geheel ongerijpt, het materiaal loopt tussen de vingers door zonder er in te knijpen. Volledig gerijpt materiaal is stevig, ook bij hard knijpen kan het niet door de vingers worden geperst.

Tabel 21 Indeling Rijpingsklasse

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
> 2,0	Ongerijpt	Zeer slap, bijna vloeibare modder

C Afleiding factor voor volumeverlies door rijping

De gezochte factor voor volumeverlies door rijping:

$$factor = \frac{1}{V_{ref}} \cdot \frac{\partial V}{\partial n}$$

Het grondvolume (per eenheid vaste stof) wordt gegeven door

$$V = \frac{A}{\rho_w} + \frac{R}{\rho_R} + \frac{L}{\rho_L} + \frac{H}{\rho_H}$$ waarin A, R, L, H massapercentages t.o.v. vaste stof.

Verder geldt

$$R + L + H = 100$$

Uitgangspunt is dat (door rijping) het volume vaste stof constant blijft, alleen het porievolume verandert.

$$V = \frac{A}{\rho_w} + C \qquad C = \frac{R}{\rho_R} + \frac{L}{\rho_L} + \frac{H}{\rho_H}$$

En voor het rijpingsgetal

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

Daaruit volgt

$$A = n(L + bH) + 0,2R$$

En dus

$$V = \frac{n(L + bH) + 0,2R}{\rho_w} + C$$

$$\frac{\partial V}{\partial n} = (L + bH) / \rho_w$$

$$V_{ref} = n_0 (L + bH) / \rho_w + 0,2R / \rho_w + C$$

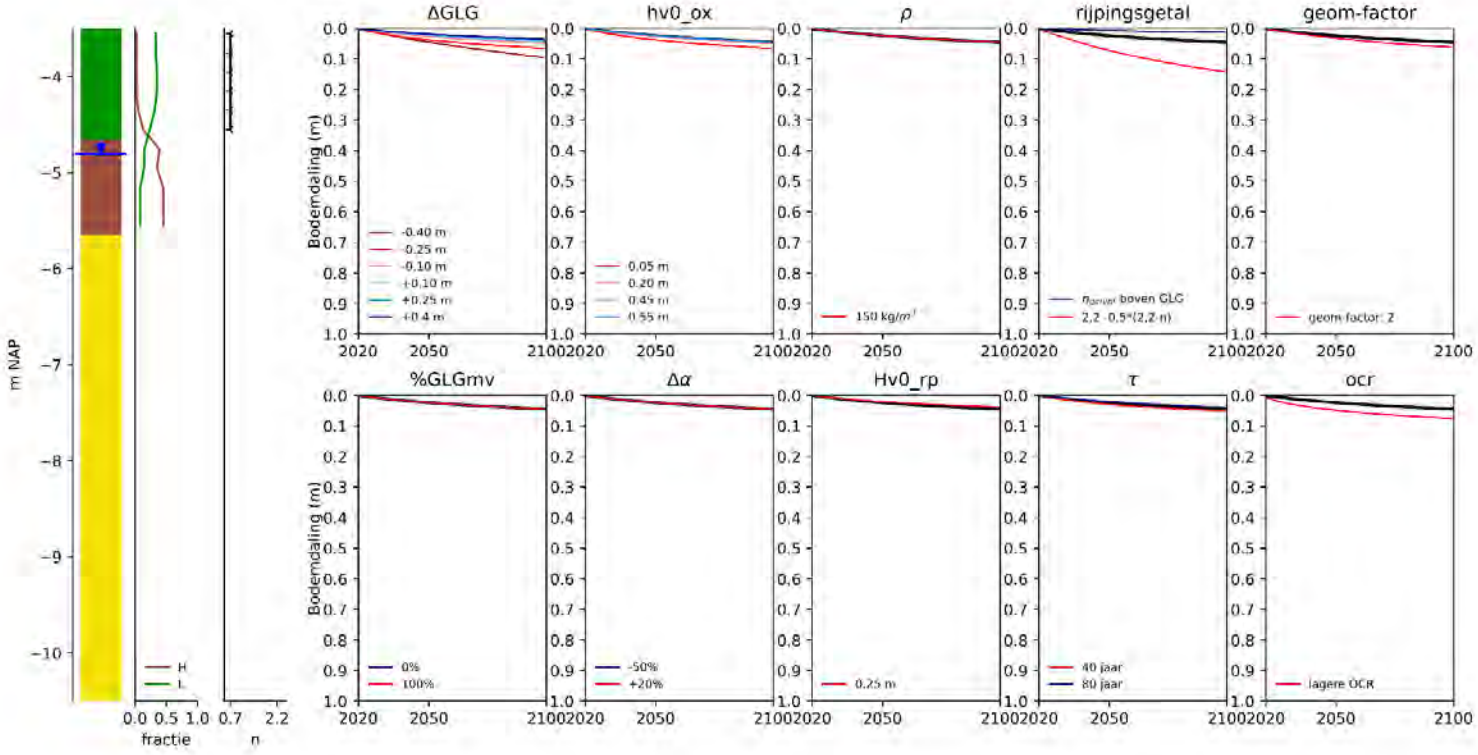
De uitdrukking voor de gezochte factor is dan

$$factor = \frac{(L + bH) / \rho_w}{n_0 (L + bH) / \rho_w + 0,2R / \rho_w + C}$$

Indien gewerkt wordt met dichtheid met eenheid g/cm^3 of kg/dm^3 dan is de numerieke waarde van $\rho_w \approx 1$, en zou deze weg gelaten kunnen worden in te formule.

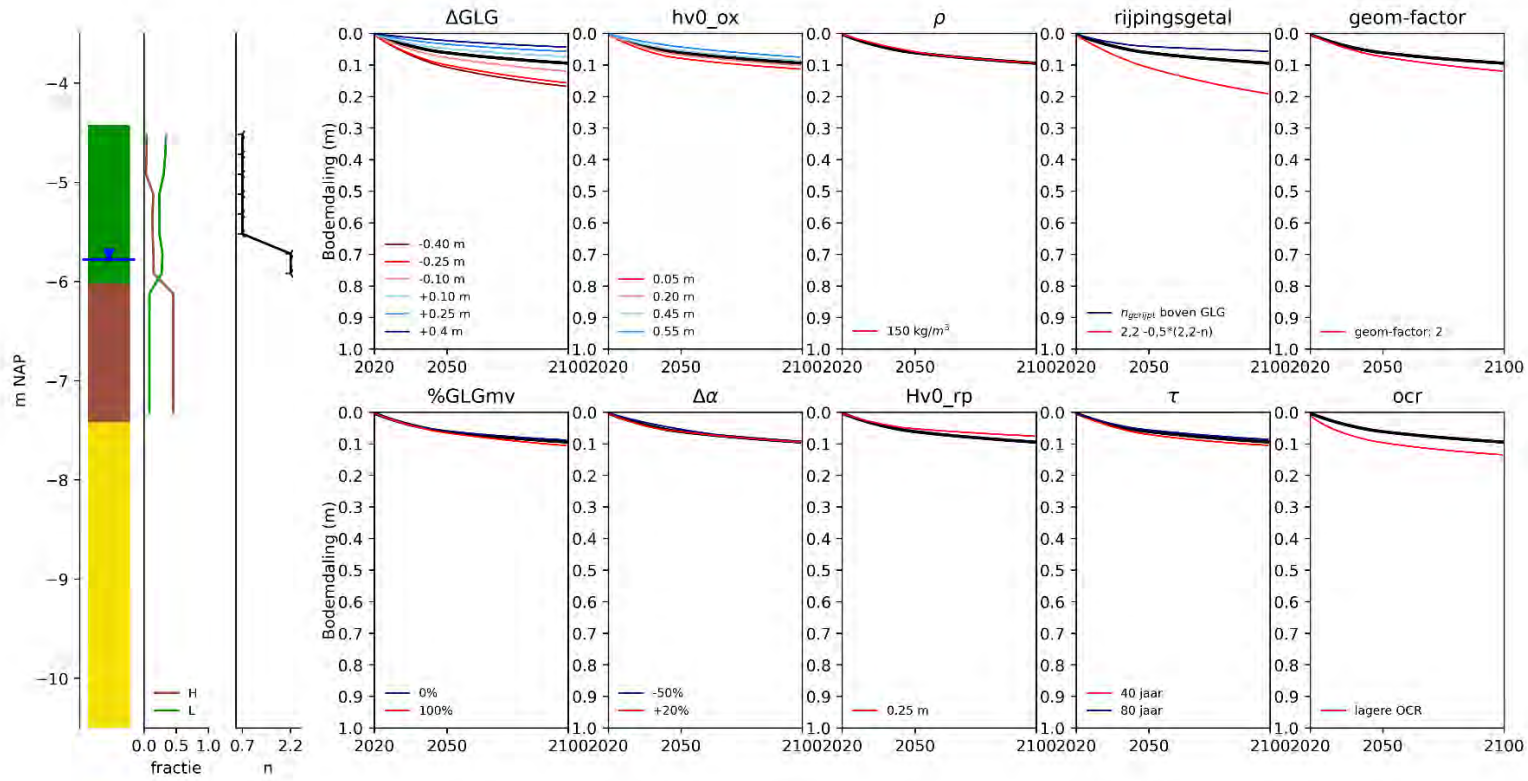
D Resultaten gevoeligheidsanalyse per locatie met toelichting

D.1 ZF.A



Donkergroen: klei; Lichtgroen: zavel
Bruin: veen; Geel: zand

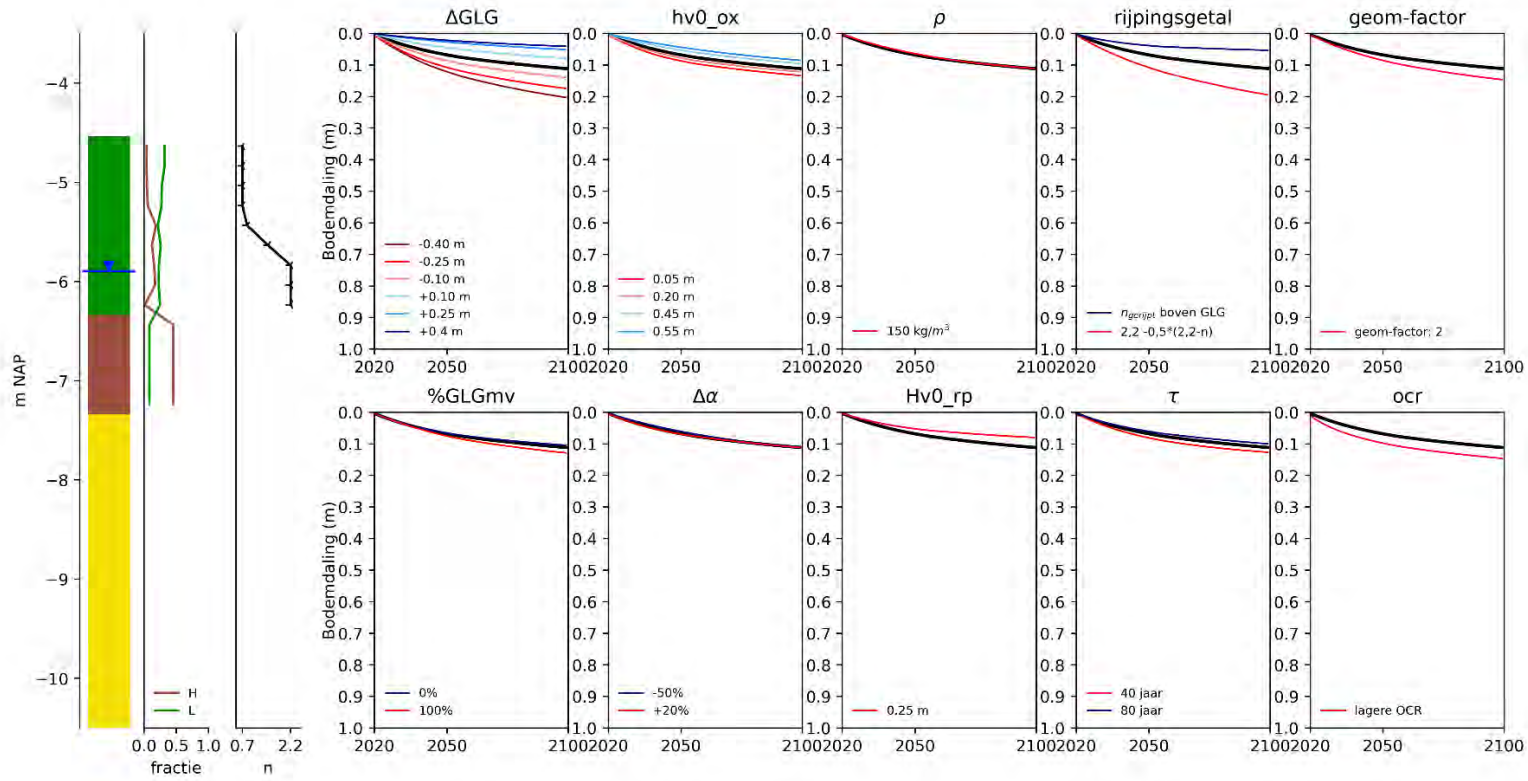
D.2 ZF.B



Donkergroen: klei; Lichtgroen: zavel

Bruin: veen; Geel: zand

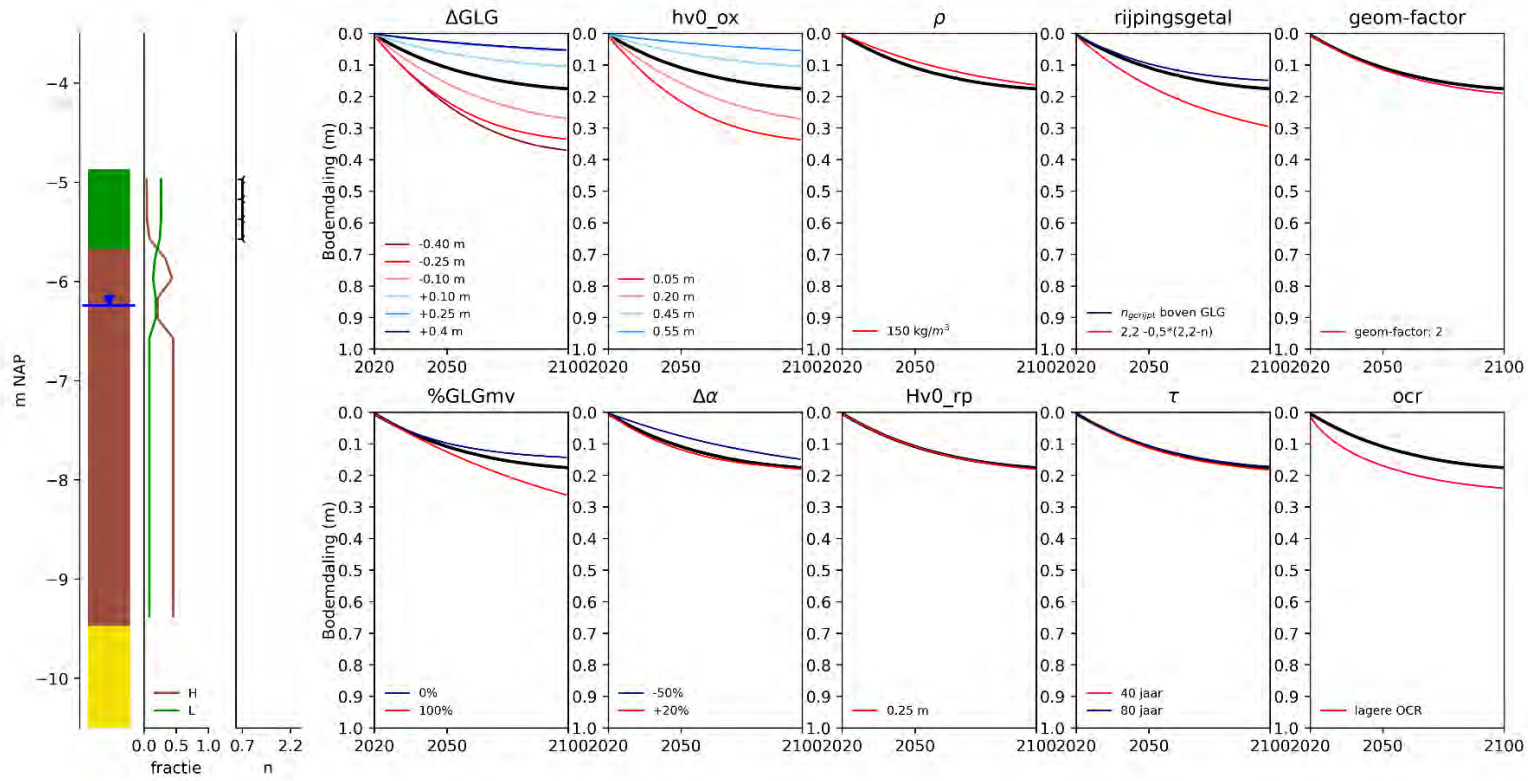
D.3 ZF.C



Donkergroen: klei; Lichtgroen: zavel

Bruin: veen; Geel: zand

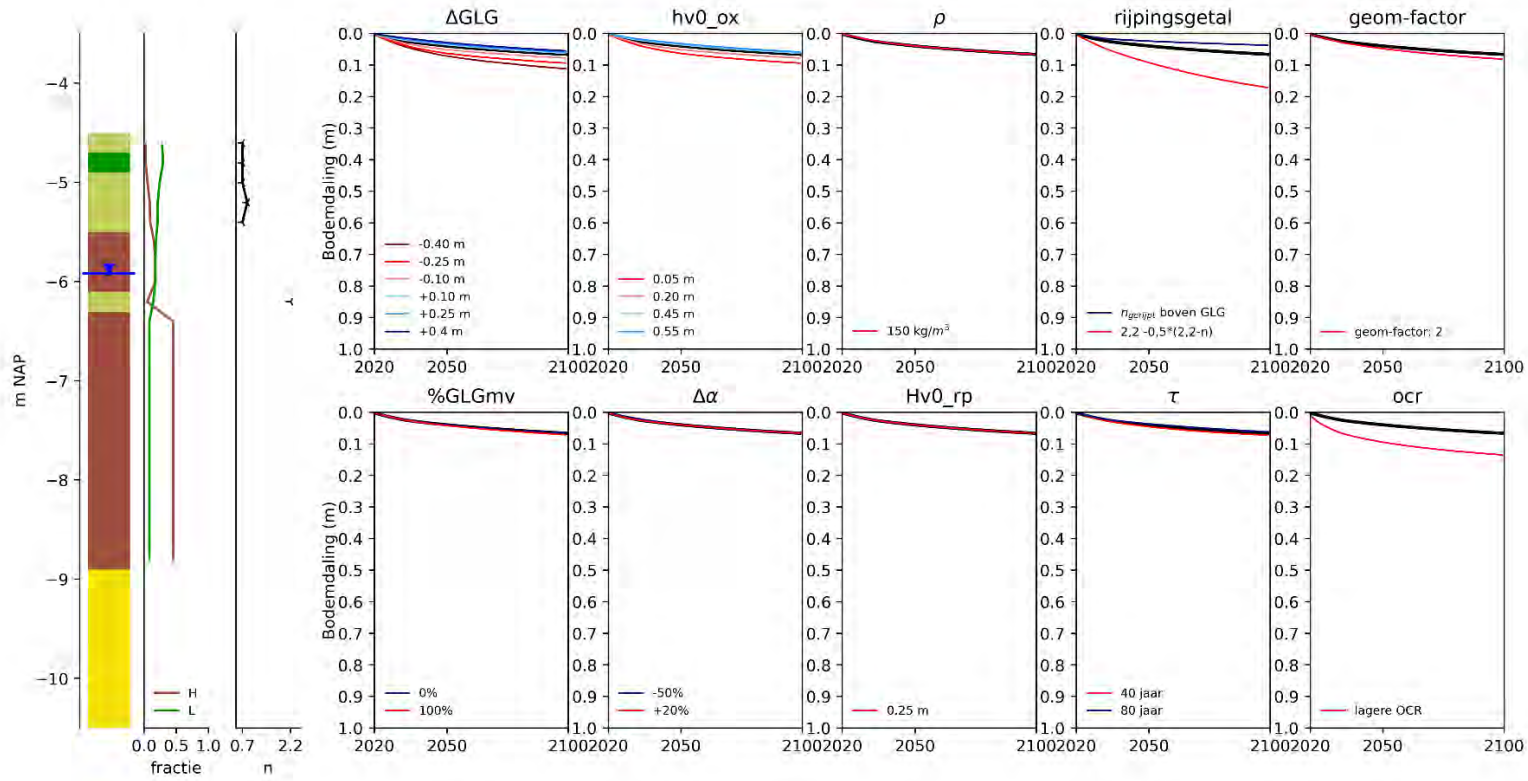
D.4 ZF.D



Donkergroen: klei; Lichtgroen: zavel

Bruin: veen; Geel: zand

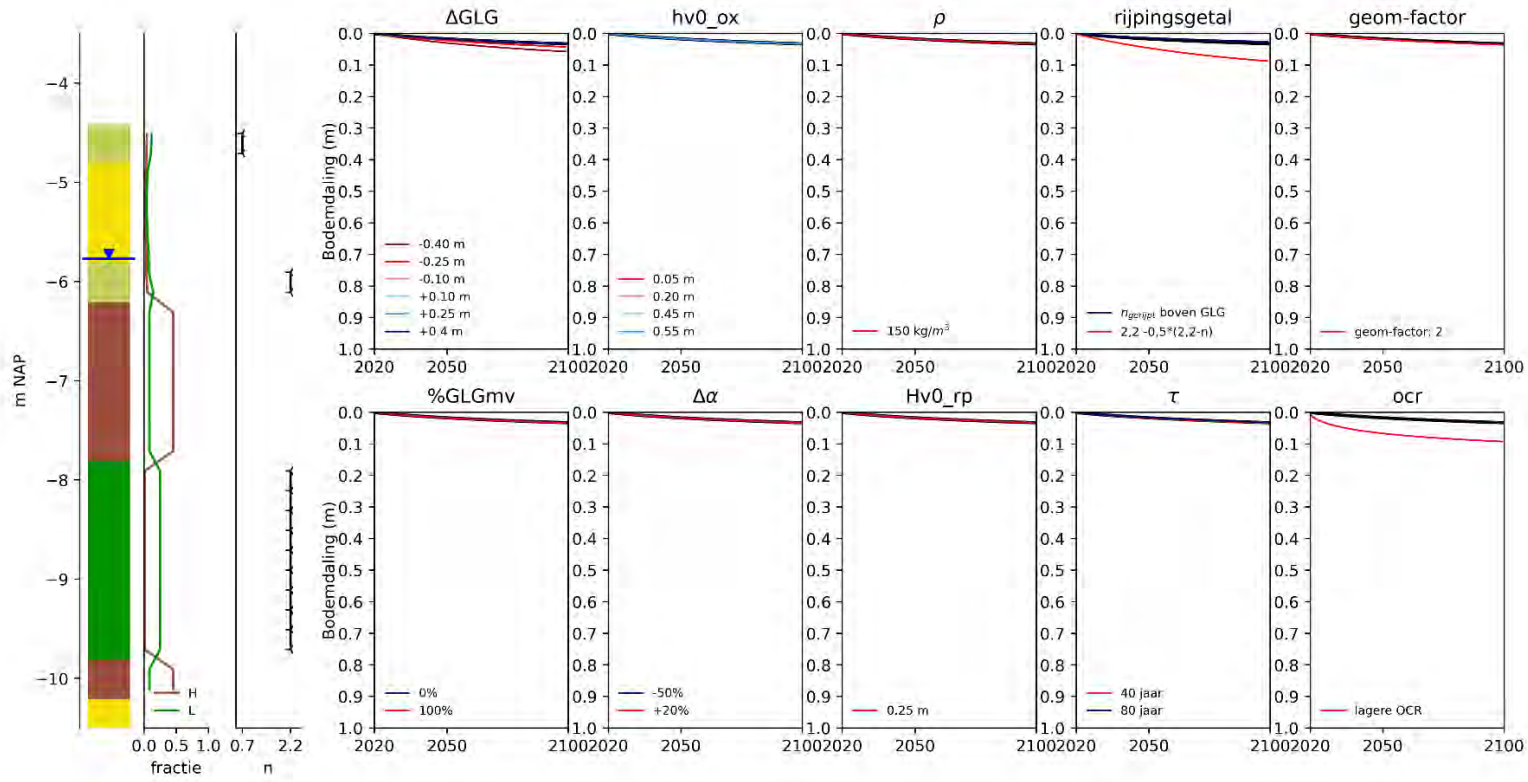
D.5 ZF.E



Donkergroen: klei; Lichtgroen: zavel

Bruin: veen; Geel: zand

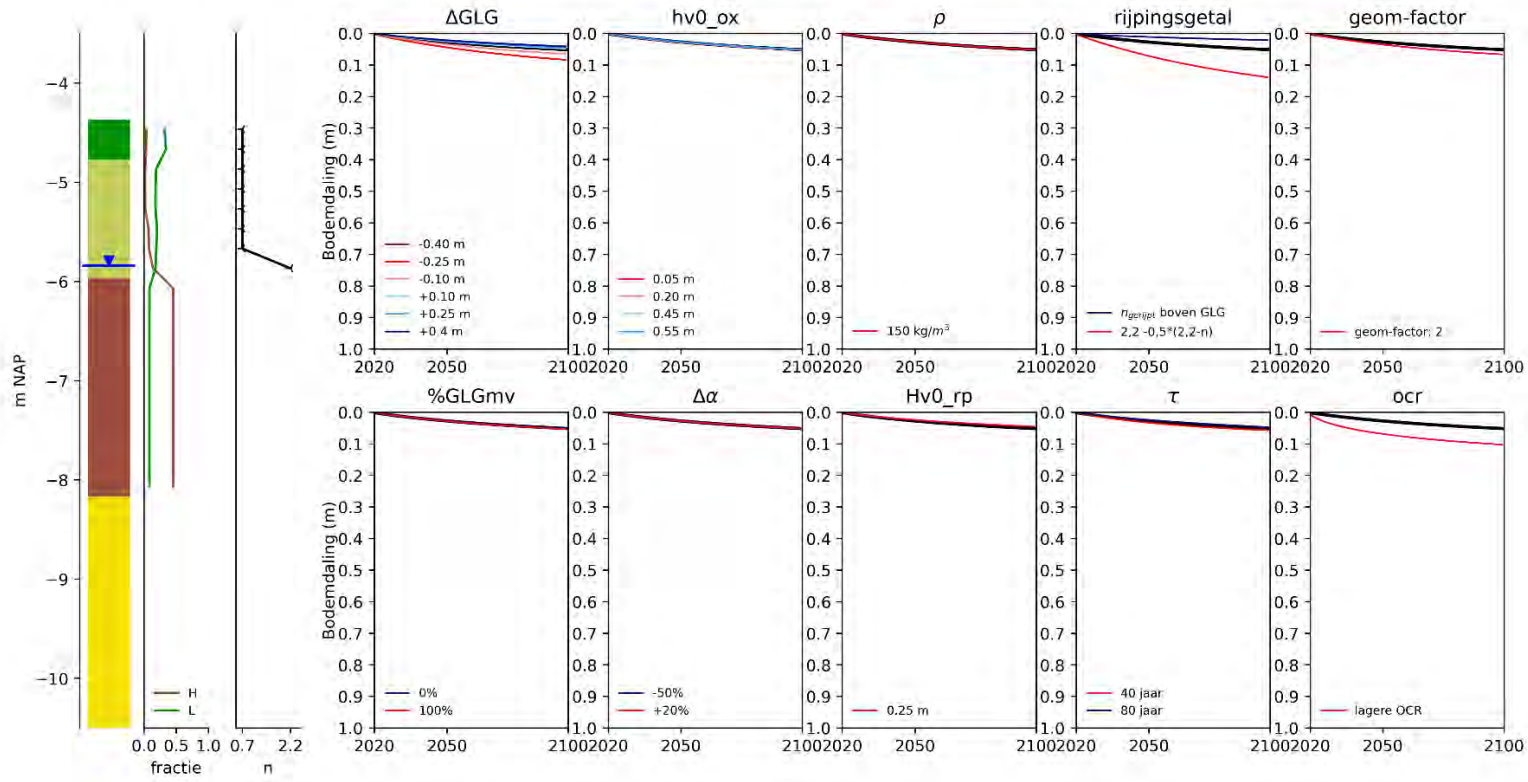
D.6 OF.A



Donkergroen: klei; Lichtgroen: zavel

Bruin: veen; Geel: zand

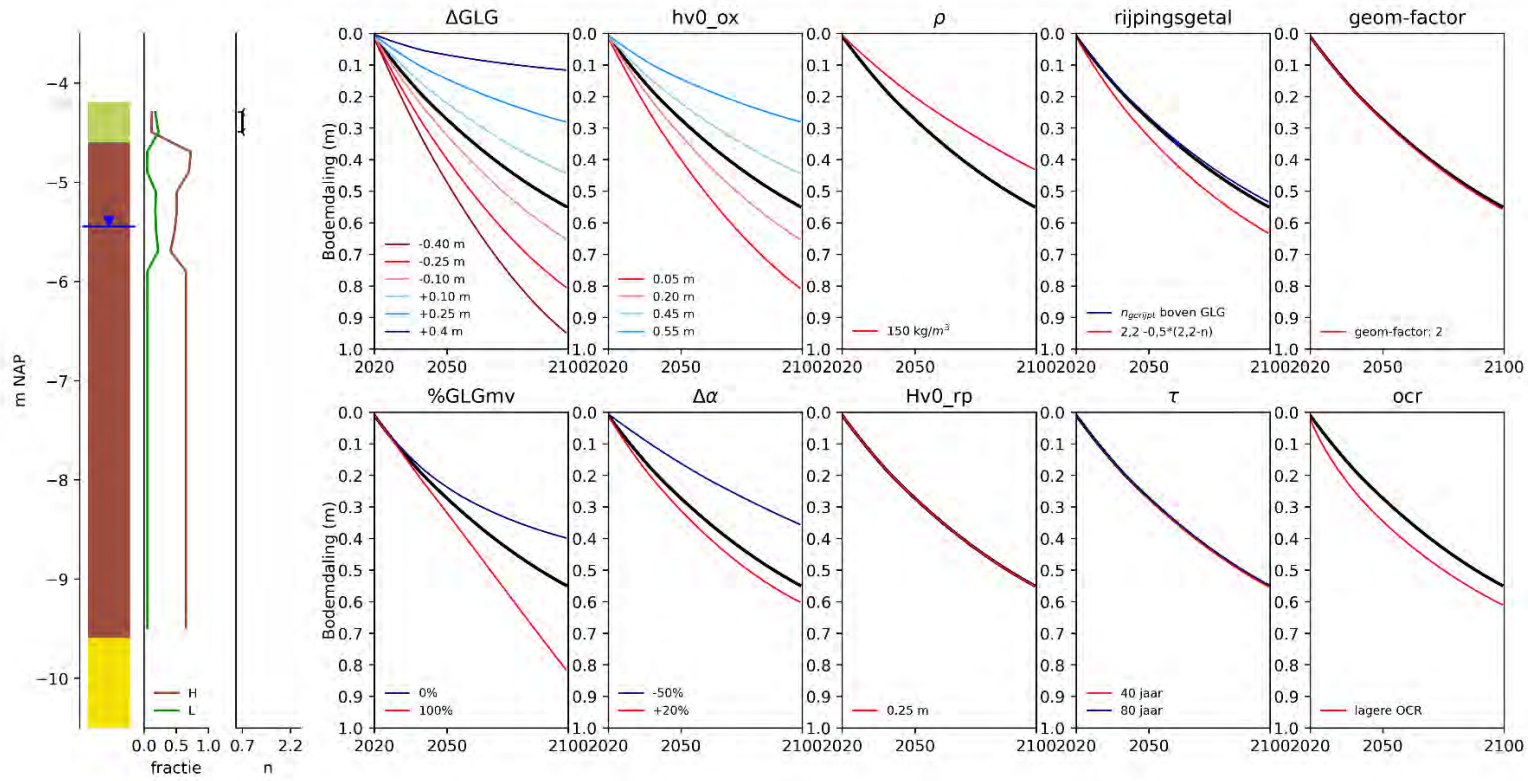
D.7 OF.B



Donkergroen: klei; Lichtgroen: zavel

Bruin: veen; Geel: zand

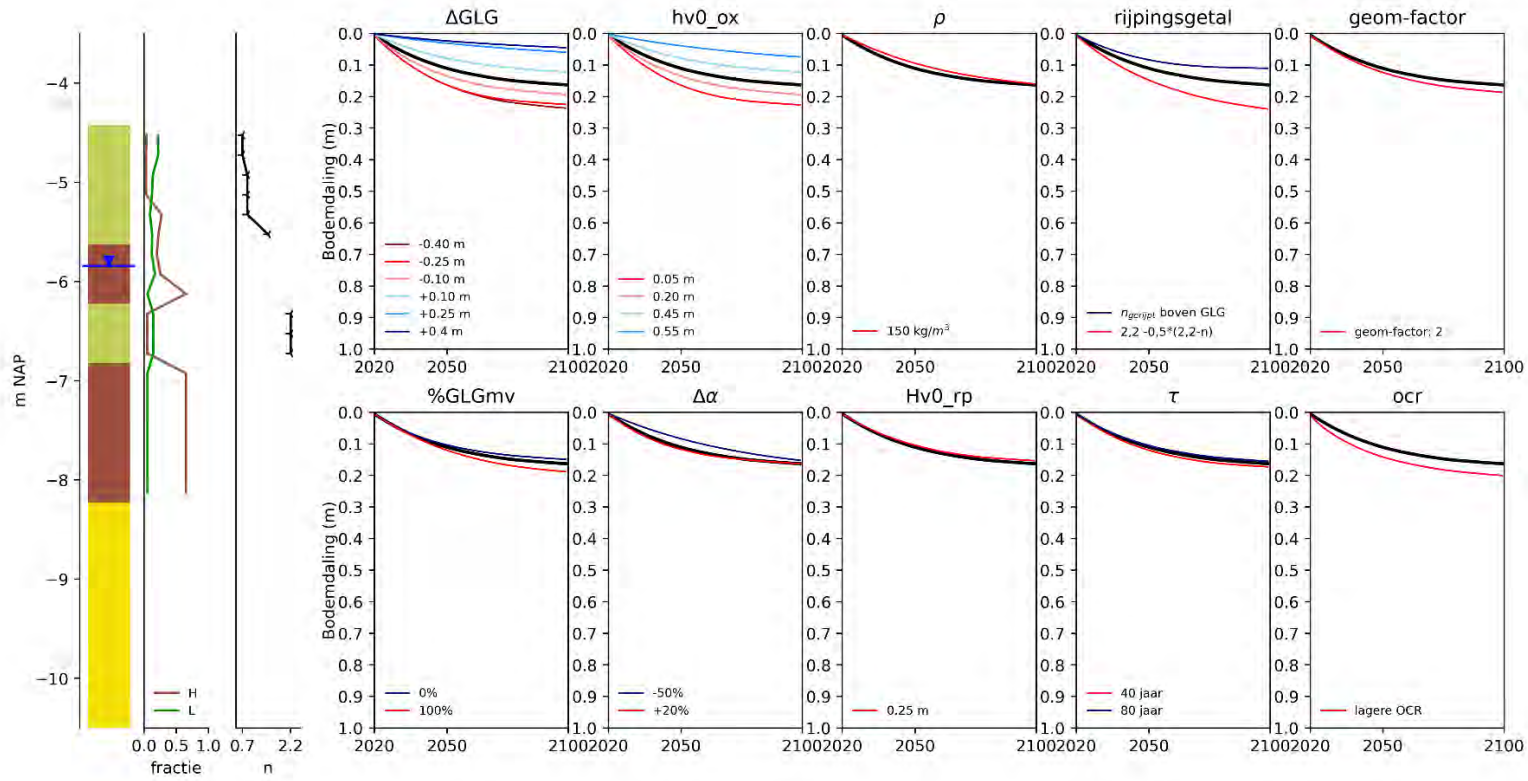
D.8 NOP.A



Donkergroen: klei; Lichtgroen: zavel

Bruin: veen; Geel: zand

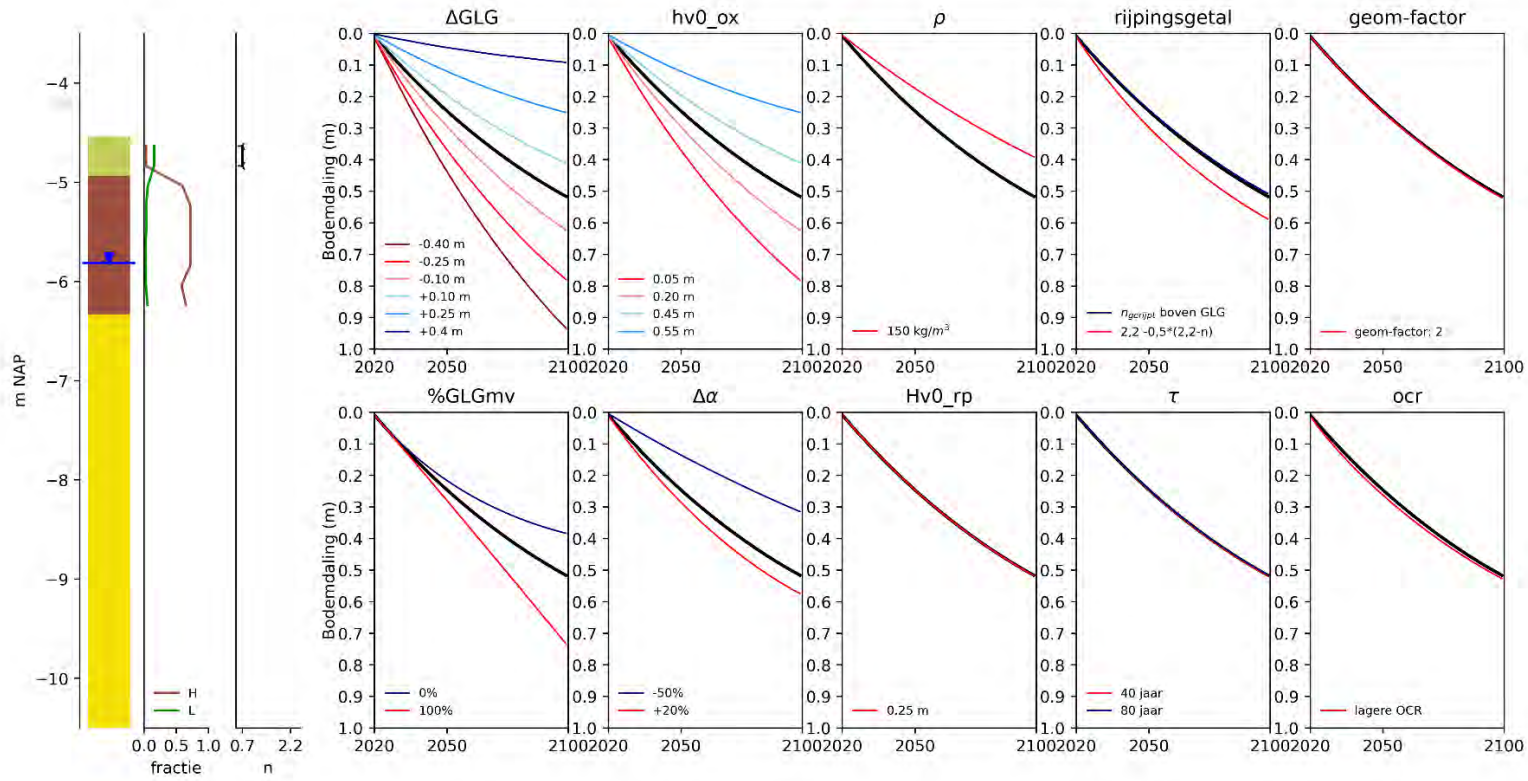
D.9 NOP.B



Donkergroen: klei; Lichtgroen: zavel

Bruin: veen; Geel: zand

D.10 NOP.C



Donkergroen: klei; Lichtgroen: zavel

Bruin: veen; Geel: zand

D.11 Toelichting

De resultaten zijn op dezelfde schaal weergegeven zodat verschillen in bodemdaling en gevoeligheid (absoluut effect op bodemdaling) direct herkenbaar zijn. De zwarte curve is het referentiescenario waarin de startparametrisatie is toegepast.

Hieronder worden de resultaten voor vier van de locaties in Zuidelijk Flevoland en één in de Noordoostpolder toegelicht om 'gevoel' te geven voor het samenspel van de drie bodemdalingsprocessen in het resultaat en hoe dat kan worden afgeleid uit de verschillende onderdelen van de resultaatfiguren. Op een vergelijkbare wijze kunnen dan ook de andere figuren worden 'gelezen'.

ZF.A (referentie)

Oxidatie:

Nauwelijks een bijdrage. Veen ligt buiten oxidatiebereik, ook geen zichtbare oxidatiebijdrage uit de deklaag (ongevoelig voor α en ρ)

Compactie:

Extreem klein; Holocene pakket beneden GLG zeer klein. Pas bij 8 m veen en/of klei onder de GLG ontstaat een bijdrage van ca. 4 cm in 2100.

Rijping:

Grootste bijdrage. Dat valt op te maken uit de gevoeligheid voor het rijpingsgetal. Het verschil met volledig gerijpte startwaarden (blauwe curve) verklaart > 80% van de totale daling.

ZF.A (gevoeligheid)

Alleen significante verlaging GLG of significante verlaging $H^0_{v,oxidatie}$ brengt veen binnen het oxidatiebereik. Rijping kan niet worden vergroot door GLG verlaging, alleen door hogere n-factoren aan de deklaag toe te kennen.

ZF.B (referentie)

Oxidatie:

Veen buiten oxidatiebereik, wel oxidatiebijdrage deklaag doordat het organisch stofgehalte (H) vrij hoog is. De oxidatiebijdrage van de deklaag kan ook worden opgemaakt uit de gevoeligheid voor $H^0_{v,oxidatie}$; daarin is geen bijdrage van veenoxidatie.

Compactie:

Zeer klein; Holocene pakket beneden GLG zeer klein.

Rijping:

Iets meer dan ZF.A; iets meer kleidek boven GLG (zie verschil met volledig gerijpt).

ZF.B (gevoeligheid)

Grotere gevoeligheid voor GLG met name door oxidatie deklaag. Bij verlaging GLG komt ook ongerijpte klei binnen het rijpingsbereik.

ZF.C (referentie)

Oxidatie:

Veen buiten oxidatiebereik, wel oxidatiebijdrage deklaag doordat het organisch stofgehalte (H) vrij hoog is.

Compactie:

Zeer klein; Holocene pakket beneden GLG zeer klein.

Rijping:

Meer dan ZF.A en ZF.B; vooral doordat er minder sterk gerijpte klei aanwezig is boven de GLG (zie grafiek n-waarden). Het kleidek boven de GLG is ook vrij dik. De bijdrage rijping

kan weer worden afgelezen uit de gevoeligheid voor het rijpingsgetal. Het betreft ca. 50% van de totale daling.

ZF.C (gevoeligheid)

Grotere gevoeligheid voor GLG met name door oxidatie deklaag. Bij verlaging GLG komt ook ongerijpte klei binnen het rijpingsbereik.

ZF.D (referentie)

Oxidatie:

Ca. 0.3 m veen in het oxidatiebereik zorgt voor leeuwendeel van de bodemdaling.

Compactie:

Grotere bijdrage dan ZF.A en ZF.B door dikker pakket veen. Maar bijdrage << 1 mm/jr.

Rijping:

Kleine bijdrage (vrij dunnen deklaag; verschil met volledig gerijpt relatief klein)

ZF.D (gevoeligheid)

Zowel verlaging en verhoging van $H^0_{v,oxidatie}$ verandert dikte veen in het oxidatiebereik. Hetzelfde geldt voor verlaging en verhoging van de GLG. Omdat de GLG bij de verhoging niet in de deklaag komt heeft dat geen invloed op rijping. De gevoeligheid voor %GLGmv is hier vrij groot. Dat komt omdat het grootste deel van de maaivelddaling door volumeverlies boven de GLG (oxidatie) ontstaat, bij een grote %GLGmv zakt de GLG daardoor ten opzichte van NAP en brengt dan ‘vers veen’ binnen het oxidatiebereik. Dat houdt de bijdrage van oxidatie in stand. Voor %GLGmv=0% wordt alleen veen dat bij aanvang al binnen het oxidatiebereik lag geoxideerd (en uitgeput).

NOP.A (referentie)

Oxidatie:

Ca. 0.5 m veen in het oxidatiebereik zorgt voor leeuwendeel van de bodemdaling. Doordat er vrij veel veen verdwijnt boven de GLG, zakt de GLG ook relatief sterk (door %GLGmv=50% in de referentieparameters). Dit zorgt voor ‘in stand houding’ van de vrij hoge bijdrage van oxidatie.

Compactie:

Ca. 4 m veenpakket (onder de GLG) draagt bij aan compactie. Zonder GLG verlaging is dit niet meer dan ca. 2 cm in 2100. De GLG daalt voor deze locatie echter relatief sterk (zie oxidatie). Dit belast het onderliggende veen en zorgt voor een wat vergrote bijdrage van compactie (niet apart gekwantificeerd).

Rijping:

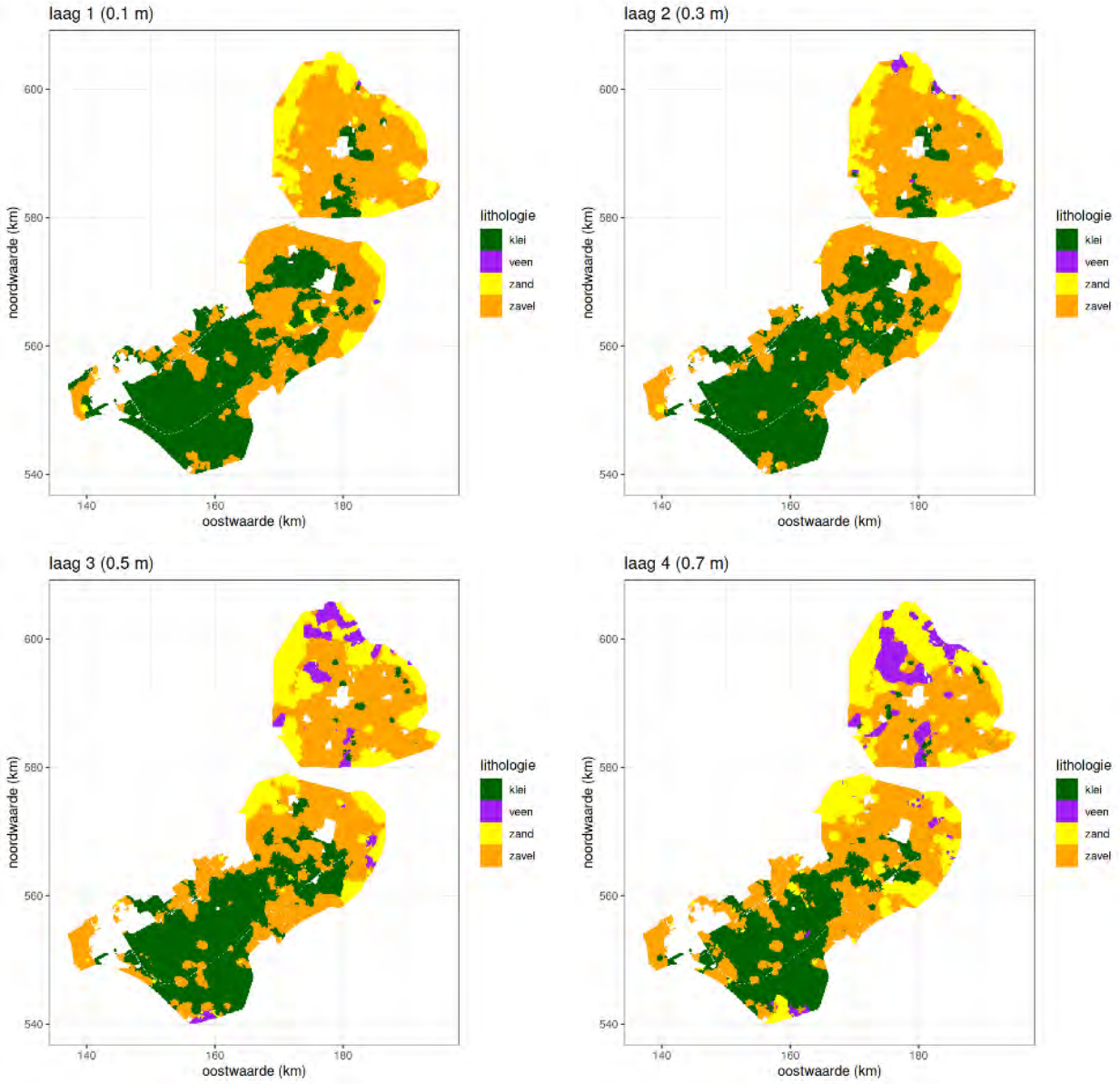
Kleine bijdrage (vrij dunnen deklaag; verschil met volledig gerijpt relatief klein)

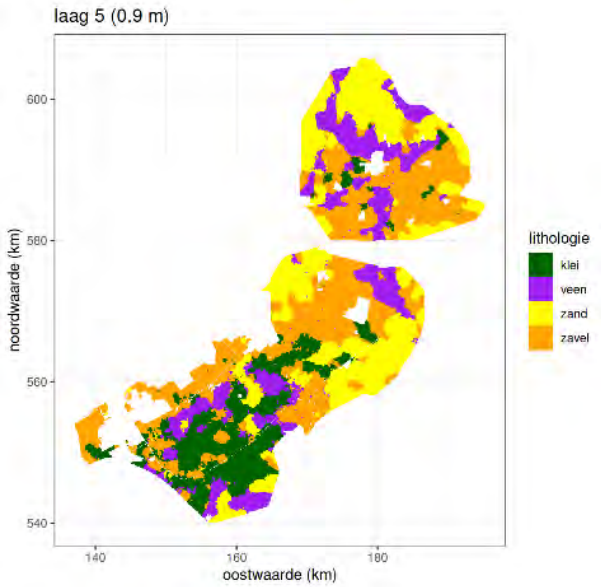
NOP.A (gevoeligheid)

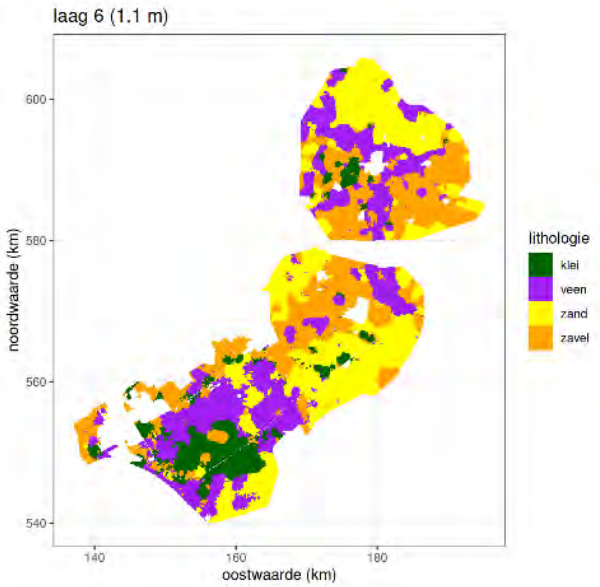
Door de grote bijdrage van oxidatie in de referentieberekening is er een grote gevoeligheid voor GLG, $H^0_{v,oxidatie}$, %GLGmv; de gevoeligheid voor α en ρ is daardoor ook groter dan in voor de besproken locaties in Zuidelijk Flevoland.

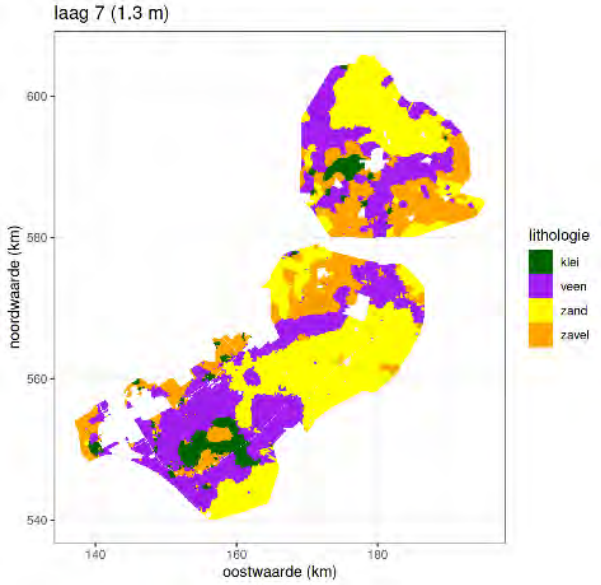
E Voxelmodel kaartbeelden

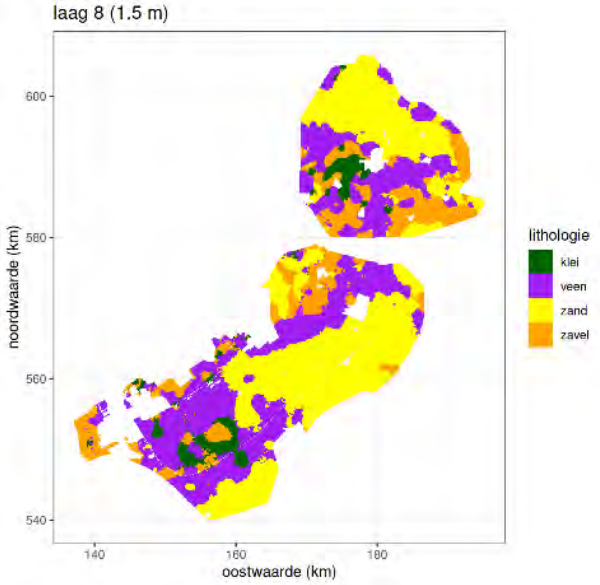
E.1 Lithoklassen (bodemdeel)



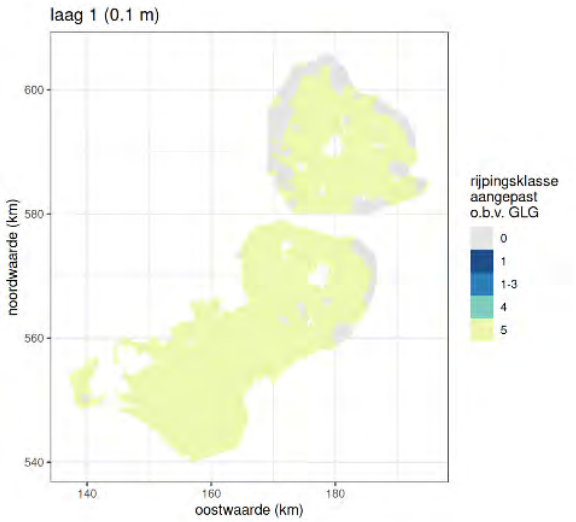

laag 5 (0.9 m)
noordwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
oostwaarde (km)
lithologie
klei
veen
zand
zavel

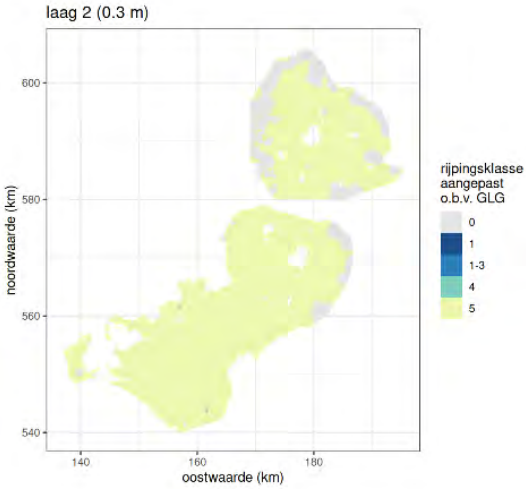

laag 6 (1.1 m)
noordwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
oostwaarde (km)
lithologie
klei
veen
zand
zavel

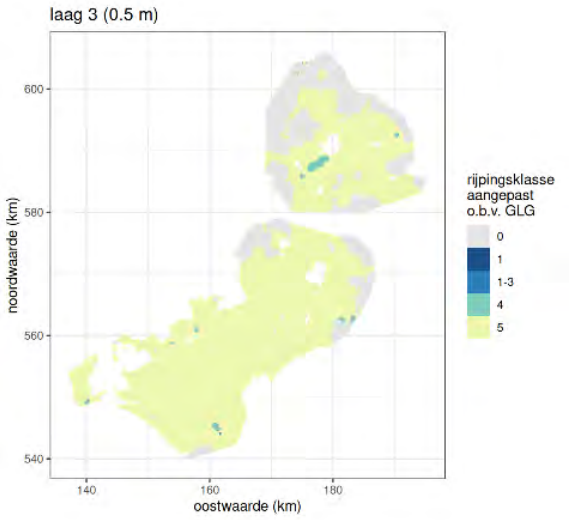

laag 7 (1.3 m)
noordwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
oostwaarde (km)
lithologie
klei
veen
zand
zavel

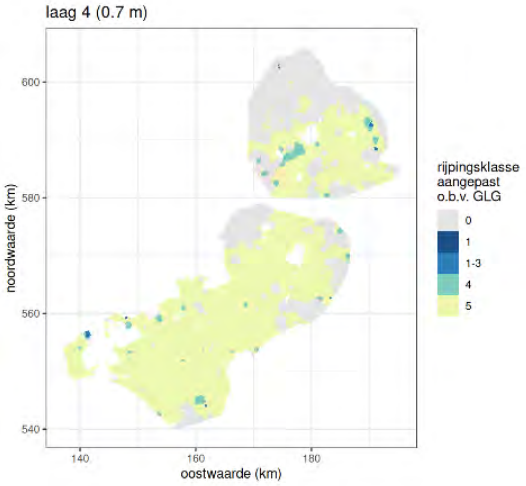

laag 8 (1.5 m)
noordwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
oostwaarde (km)
lithologie
klei
veen
zand
zavel

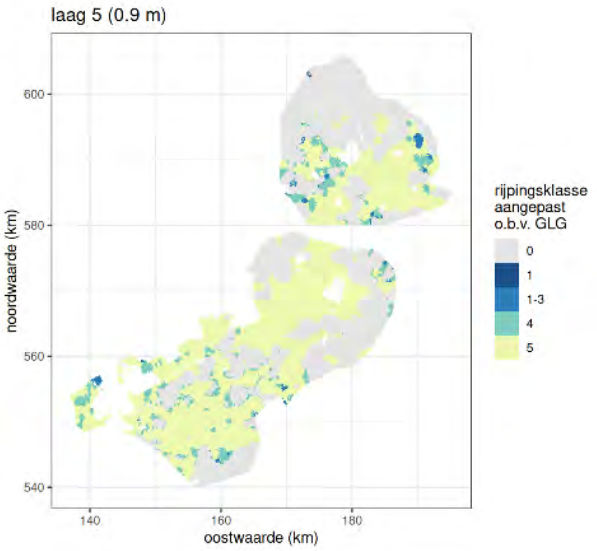
E.2 Rijpingsklassen (bodemdeel)

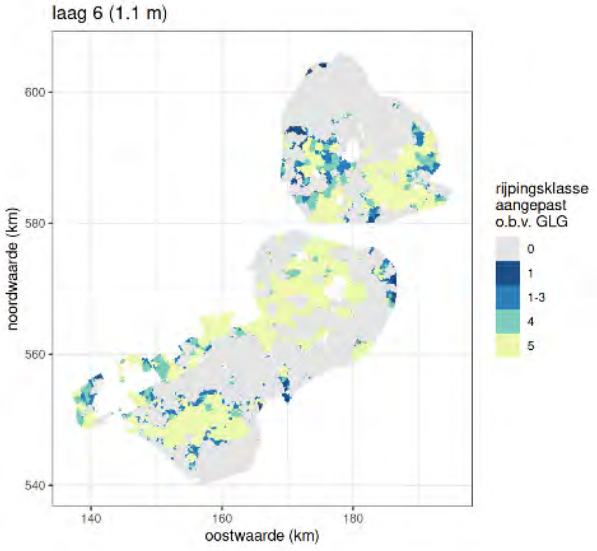


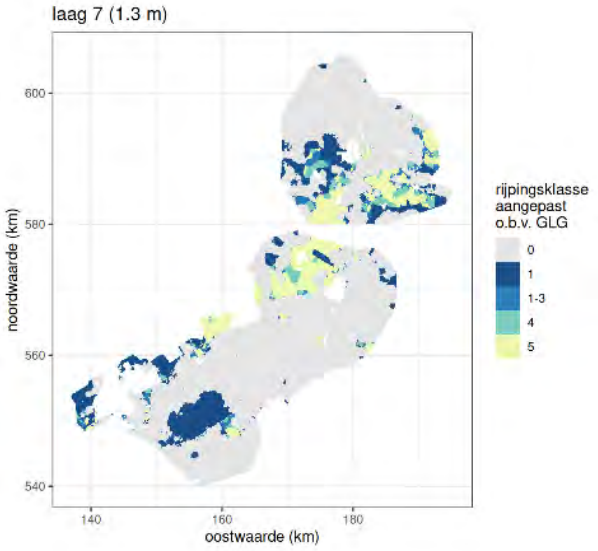


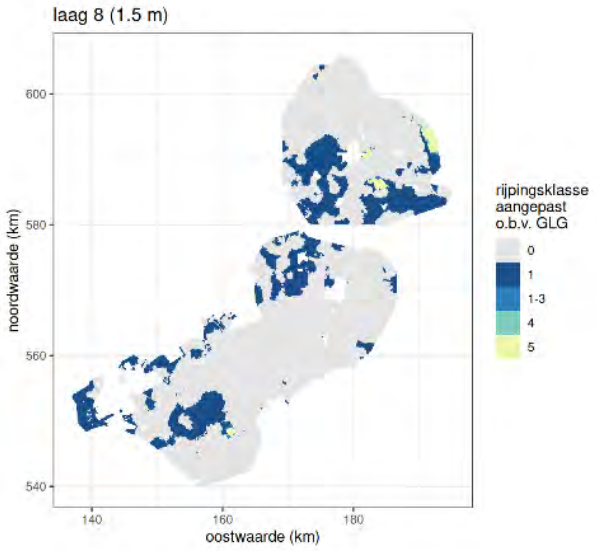




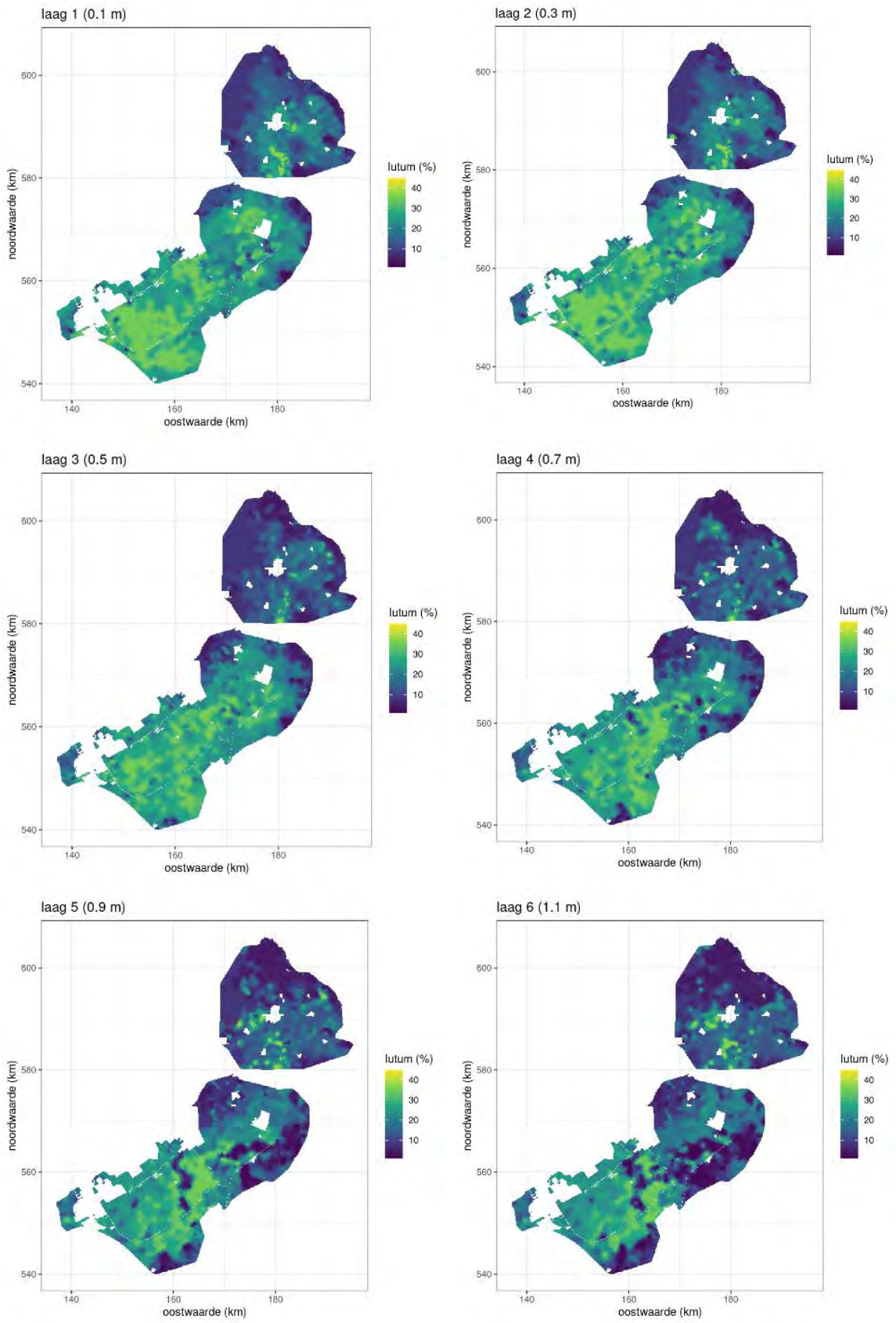

laag 5 (0.9 m)
noordwaarde (km)
oostwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
rijpingsklasse
aangepast
o.b.v. GLG
0
1
1-3
4
5

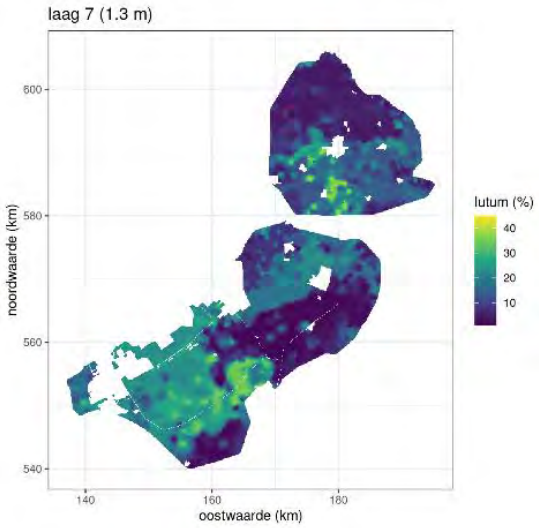

laag 6 (1.1 m)
noordwaarde (km)
oostwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
rijpingsklasse
aangepast
o.b.v. GLG
0
1
1-3
4
5

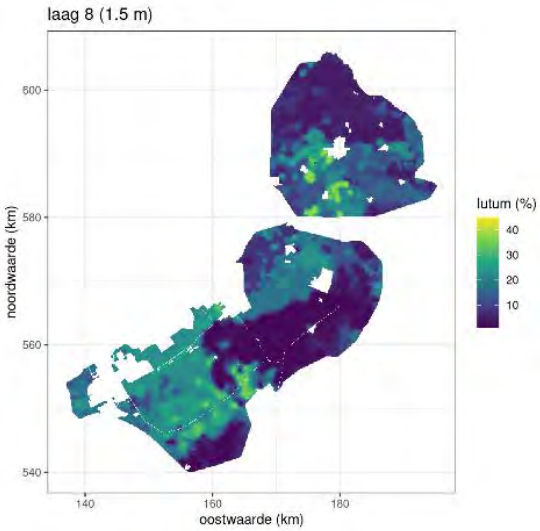

laag 7 (1.3 m)
noordwaarde (km)
oostwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
rijpingsklasse
aangepast
o.b.v. GLG
0
1
1-3
4
5


laag 8 (1.5 m)
noordwaarde (km)
oostwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
rijpingsklasse
aangepast
o.b.v. GLG
0
1
1-3
4
5

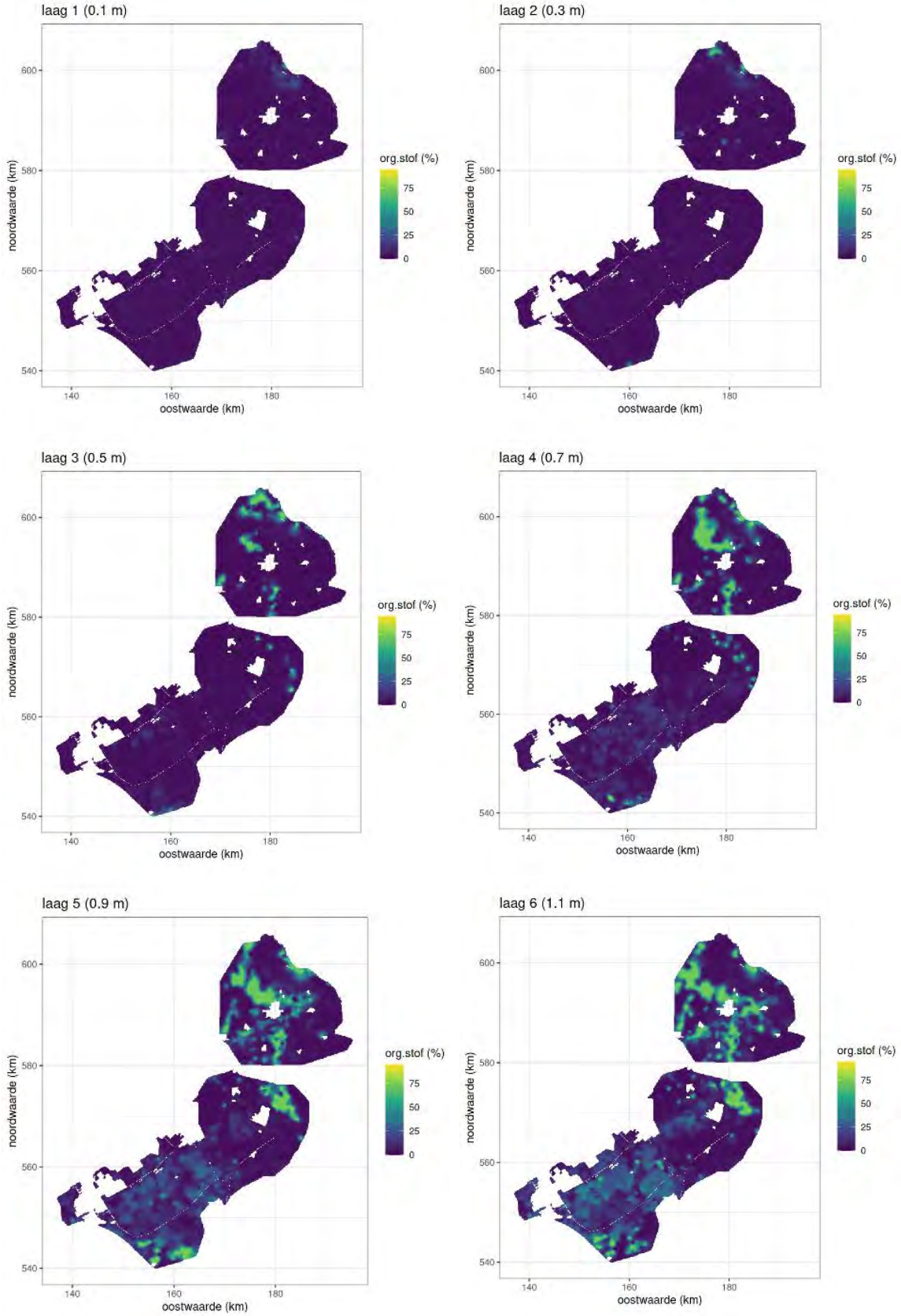
E.3 Massapercentage lutum (bodemdeel)

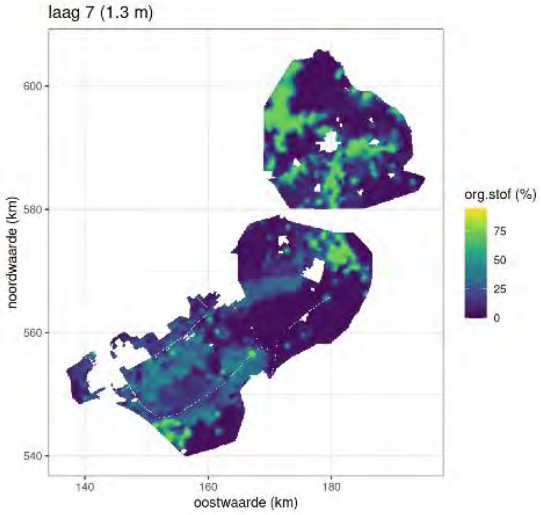


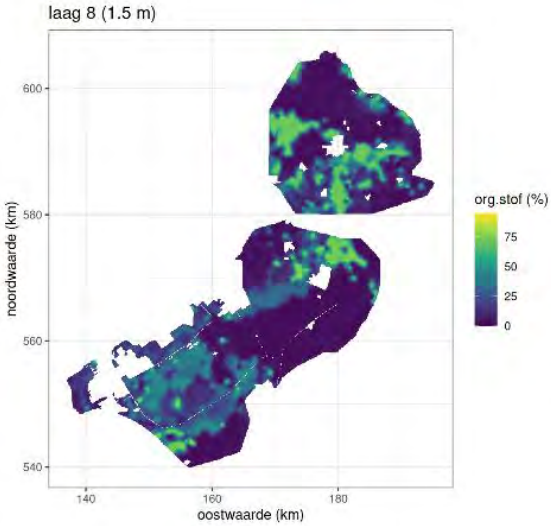

laag 7 (1.3 m)
noordwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
oostwaarde (km)
lutum (%)
40
30
20
10


laag 8 (1.5 m)
noordwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
oostwaarde (km)
lutum (%)
40
30
20
10

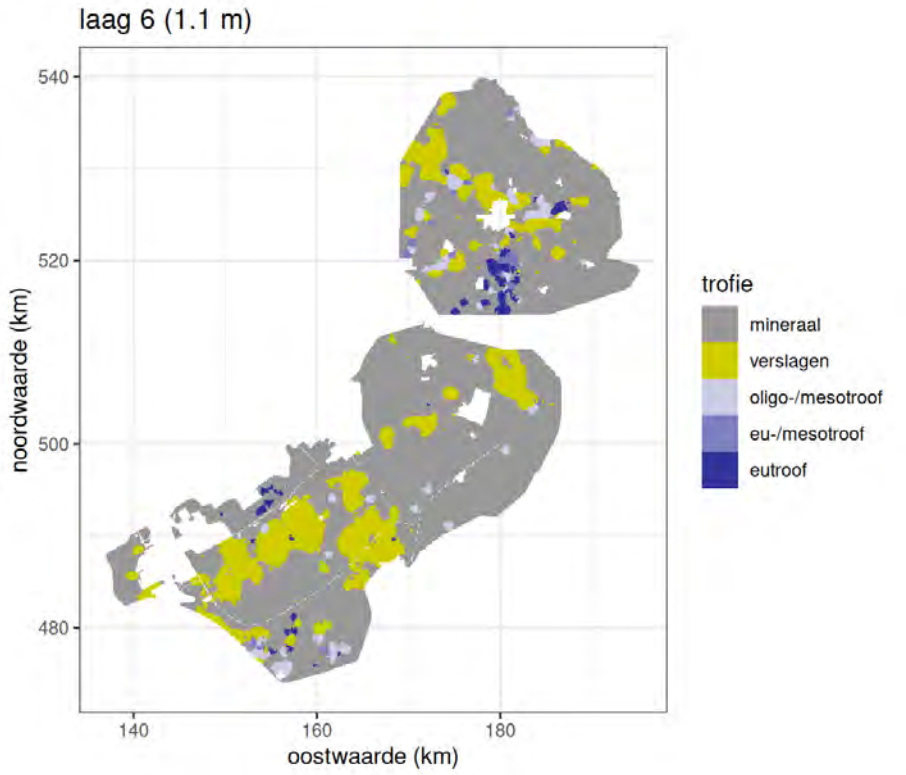
E.4 Massapercentage organische stof (bodemdeel)

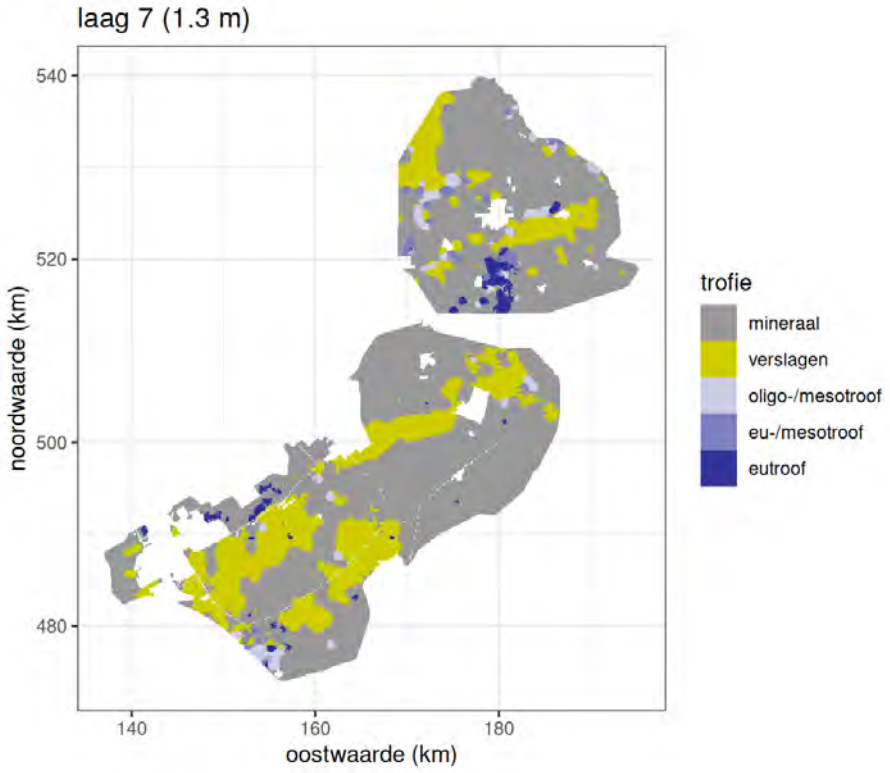


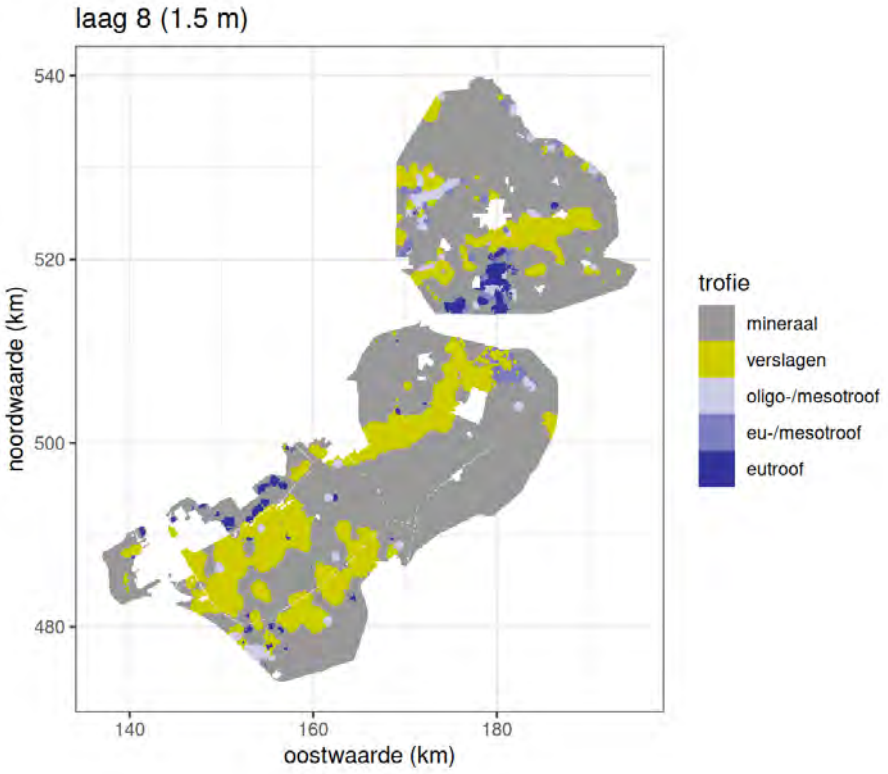

laag 7 (1.3 m)
noordwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
oostwaarde (km)
org.stof (%)
75
50
25
0


laag 8 (1.5 m)
noordwaarde (km)
600
580
560
540
140
160
180
oostwaarde (km)
org.stof (%)
75
50
25
0

E.5 Trofiegraad van het veen; veentype






laag 8 (1.5 m)
540
520
500
480
noordwaarde (km)
140
160
180
oostwaarde (km)
trofie
mineraal
verslagen
oligo-/mesotroof
eu-/mesotroof
eutroof

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl