

The background of the page is a landscape photograph. It shows a wide, green field with a small, winding stream or ditch. In the distance, there are several high-voltage power line towers and some buildings, including a church spire. The sky is overcast with grey clouds, and a bright light source is visible behind the clouds, creating a lens flare effect. A person in an orange safety vest is standing on the left side of the field.

RELATIEVE BODEMDALING VAN VEENTERPEN IN WATERLAND: DE INVLOED VAN LOKALE BODEMOPBOUW EN WATERHUISHOUDING

door

Laas Olivier Schölvink

Bachelor scriptie

Aarde, Economie en Duurzaamheid

Vrije Universiteit Amsterdam

26-6-2026

Samenvatting

Dit onderzoek analyseert de relatieve bodemdaling van veenterpen in de regio Waterland en de invloed van lokale bodemopbouw en waterhuishouding op dit proces. De centrale vraag is in hoeverre variaties in bodemdaling van veenterpen kunnen worden verklaard door de dikte van de ophooglaag van de veenterp, de mate van lokale drooglegging en de afstand tot een sloot. Met een GIS-analyse zijn LiDAR-hoogtemodellen (AHN2 en AHN5) gebruikt om de lokale bodemdaling tussen 2011 en 2023 te kwantificeren, waarna deze met lineaire regressieanalyses is gerelateerd aan drooglegging, bodemopbouw en slootafstand. De drooglegging is afgeleid uit lokale peilbesluiten en de bodemopbouw is bepaald op basis van 38 boorprofielen verspreid over tien veenterpen. Verwacht werd dat een dikkere ophooglaag een beschermend effect zou hebben op het onderliggende veen en dat een grotere drooglegging zou leiden tot meer bodemdaling.

De resultaten tonen dat de veenterpen in negen van de tien gevallen langzamer dalen dan hun directe omgeving, met verschillen die oplopen tot enkele centimeters. Uit de regressieanalyses blijkt dat drooglegging de dominante verklarende factor is voor de variatie in bodemdaling; een grotere ontwatering hangt samen met een hogere dalingssnelheid van zowel veenterpen als omliggende percelen. Afzonderlijke bodemopbouwvariabelen vertonen geen significante individuele relatie met bodemdaling. Ook het effect van de slootafstand blijkt geen individueel verklarend mechanisme. De aanwezigheid van een veenterp als geheel blijkt echter wel een stabiliserend effect te hebben, waarbij de negatieve invloed van drooglegging binnen de veenterpcontouren minder sterk is dan daarbuiten. Deze resultaten benadrukken het belang van de lokale waterhuishouding en suggereren dat de mate van ontwatering een belangrijke rol speelt bij zowel het ontstaan als de beheersing van bodemdaling in veengebieden, evenals de reactie van veenterpen op deze ontwatering.

Dankwoord

Ik wil Eric Koomen bedanken voor zijn begeleiding vanuit de Vrije Universiteit bij het schrijven van deze bachelorscriptie, evenals tijdens mijn eerdere stage bij het 4D Research Lab van de Universiteit van Amsterdam, waar ik de bruikbaarheid van LiDAR-data op veenterpen heb onderzocht en waaruit het onderwerp voor deze scriptie is voortgekomen. Na de prettige samenwerking tijdens mijn stage was de keuze om mijn scriptie eveneens onder zijn begeleiding uit te voeren snel gemaakt.

Mijn dank gaat tevens uit naar Mina Jordanov, archeoloog bij de Gemeente Amsterdam, met wie ik dit onderzoek het veld in ben gegaan om twee extra (mogelijke) veenterpen te onderzoeken. Zij heeft mij begeleid bij de lithologische interpretatie in het veld en het verwerken van de data in afleesbare boorprofielen.

Daarnaast wil ik mijn stagebegeleiders Jitte Waagen en Mason Scholte bedanken voor het faciliteren en begeleiden van mijn stage bij het 4D Research Lab in de winter van 2025, evenals voor het beschikbaar stellen van hun drone-gebaseerde fotogrammetrische en LiDAR-data van het onderzoeksgebied.

Inhoud

1.	Inleiding	1
2.	Theoretisch kader	5
3.	Data	8
4.	Methode	12
4.1	Kwantificeren van bodemdaling	12
4.2	Bodemopbouw	14
4.3	Waterhuishouding	15
4.4	Samenhang	16
5.	Resultaten	18
5.1	Kwantificeren bodemdaling	18
5.2	Bodemopbouw	20
5.3	Drooglegging	20
5.4	Samenhang	22
5.4.1	Veenterniveau	22
5.4.2	Perceelniveau	23
6.	Discussie	25
7.	Conclusie	28
	Referenties	29
	Bijlagen	31
1.	Dwarsdoorsnede onderzoeksgebied	31
2.	AHN- en drone-metadata	32
3.	Locaties grondboringen	33
4.	Figuren bodemdalingskwantificatie	34
5.	Verwerkte boorgegevens	38
6.	Veenterniveau: regressiescript en volledige outputs	39
7.	Perceelniveau: regressiescript en volledige outputs	43
8.	Boorbeschrijvingen	48

Lijst van figuren

Figuur 1: Voorbeeld van een veenterp weergegeven in een LiDAR-afgeleid hoogtemodel (links) en een fotogrammetrische terreinweergave (rechts). Beide laten zien dat een veenterp slechts een lichte verhoging in het landschap vormt.	1
Figuur 2: Locatie van onderzoeksgebieden Zunderdorp en Kinselmeer, met omliggende veenterpvindplaatsen.....	3
Figuur 3: Selectie vindplaatsen op basis van beschikbaarheid boorprofielen verdeeld over de onderzoeksgebieden.	4
Figuur 4: Schematische weergave van drooglegging en ontwateringsdiepte. Drooglegging wordt gedefinieerd als het verschil tussen maaiveld en slootpeil. De ontwateringsdiepte is het verschil tussen maaiveld en de opbolling. Overgenomen uit Gespreksgroep Hydrologische Terminologie (1986).....	6
Figuur 5: Conceptueel model van de relatie tussen hydrologie, bodemopbouw en bodemdaling van veenterpen.....	7
Figuur 6: Peilgebieden waarin de veenterpen vallen met bijbehorende peilhoogtes vanaf 2013, weergegeven in m NAP. De overige peilgebieden zijn buiten beschouwing gelaten in de figuur.	10
Figuur 7: Overzicht van de tien onderzochte veenterpen in het drone-afgeleide hoogtemodel (4DRL) met uniforme hoogteschaal.	11
Figuur 8: Overzichtskaart bodemdaling Zunderdorp, afgeleid uit het verschil tussen AHN5 en AHN2 hoogtemodellen.....	12
Figuur 9: Overzichtskaart bodemdaling Kinselmeer, afgeleid uit het verschil tussen AHN5 en AHN2 hoogtemodellen.....	13
Figuur 10: Uitgesloten deel van een perceel voor de berekening van de gemiddelde bodemdaling, weergegeven in het hoogteverschilraster (links) en een fotogrammetrische terreinweergave (rechts).	14
Figuur 11: Voorbeeld van een bepaling van de kleidikte en deklaagdikte. De lithologisch onderscheiden kleilaag (blauw) wordt gedefinieerd als de lokale kleidikte (45 cm), de deklaagdikte betreft het totale pakket boven de ongestoorde de Formatie van Nieuwkoop (150 cm).	15
Figuur 12: Gemiddelde bodemdaling veenterpen en omliggend perceel Cat 1 & Cat 2.....	19
Figuur 13: Gemiddelde bodemdaling veenterp en omliggend perceel Cat 103	19
Figuur 14: Drooglegging in het onderzoeksgebied Kinselmeer, berekend als het hoogteverschil tussen maaiveld (AHN2) en de peilbesluiten uit 2013.	21
Figuur 15: Drooglegging in het onderzoeksgebied Zunderdorp, berekend als het hoogteverschil tussen maaiveld (AHN2) en de peilbesluiten uit 2013.	21

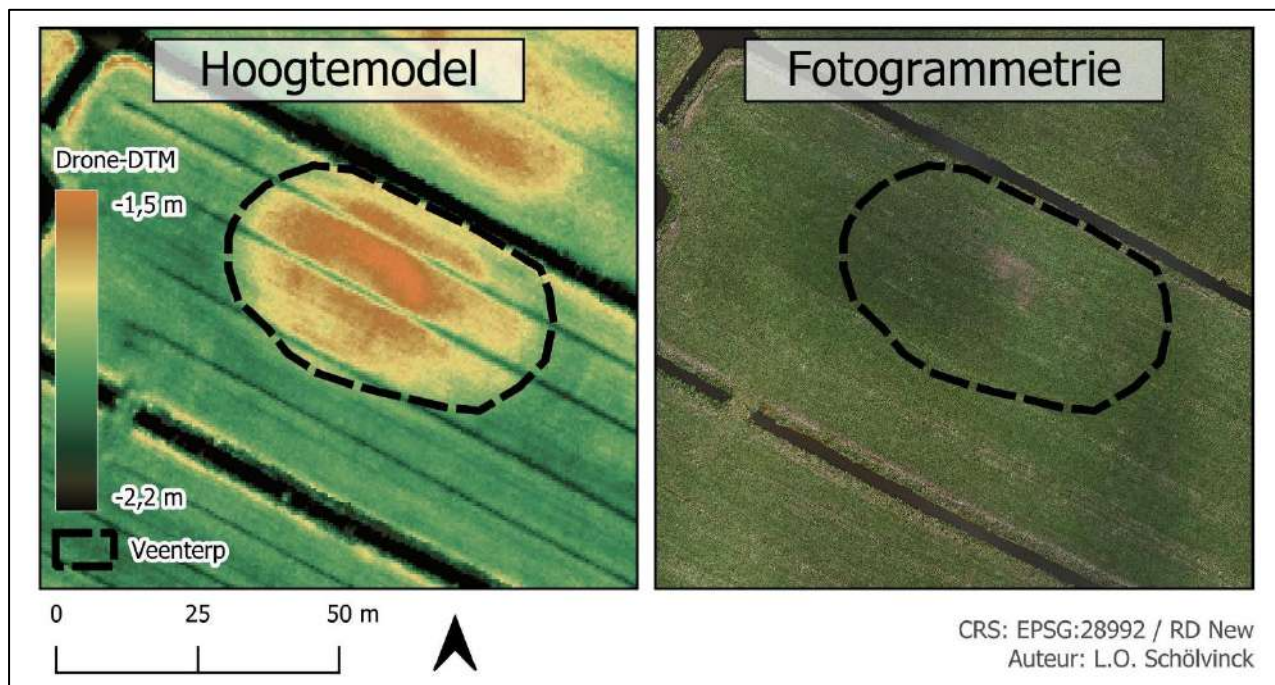
Lijst van tabellen

Tabel 1: Verdeling veenterpvindplaatsen over de deelgebieden, inclusief aantal boorprofielen en datering.	9
Tabel 2: Verdeling veenterpen over de peilgebieden, inclusief peil vanaf 2017 en 2013.	9
Tabel 3: Gemiddelde bodemdaling tussen 2011 en 2023 binnen veenterpen en in de omliggende percelen.....	18
Tabel 4: Gemiddelde kleidikte en deklaagdikte per veenterp, inclusief standaardafwijkingen, gebaseerd op de boorprofielen (Bijlage 8)	20
Tabel 5: Gemiddelde drooglegging per veenterp gebaseerd op het droogleggingsraster	20
Tabel 6: OLS-regressieresultaten op veenterpniveau voor de verklaring van variatie in bodemdaling aan de hand van drooglegging en bodemopbouw (kleidikte en deklaagdikte). Coëfficiënten (β) worden weergegeven met standaardfouten tussen haakjes. Significantie is weergegeven met * $p < 0,10$, ** $p < 0,05$ en *** $p < 0,01$. Model fit wordt weergegeven met R^2 ..	22
Tabel 7: OLS regressieresultaten op perceelniveau voor de verklaring van variatie in bodemdaling door drooglegging, slootafstand en de ligging (Terpdummy). Coëfficiënten (β) worden weergegeven met standaardfouten tussen haakjes. Perceel-fixed effects zijn opgenomen waar aangegeven. Modellen 2.3-2.5 betreffen alternatieve specificaties van de slootafstandvariabele (lineair, log-getransformeerd en enkel het effect binnen de eerste 5 meter vanaf de slootrand). Significantie is weergegeven met * $p < 0,10$, ** $p < 0,05$ en *** $p < 0,01$. Model fit wordt weergegeven met R^2	23

1. Inleiding

Nederlandse veengronden worden gekenmerkt door aanhoudende bodemdaling. Met name landgebruik en daarmee samenhangende waterhuishouding bepalen de snelheid hiervan (Erkens et al., 2016). Verlaging van de grondwaterstand leidt tot ontwatering van het veen, waardoor organisch materiaal wordt blootgesteld aan zuurstof, wat leidt tot krimp, oxidatie en consolidatie als gevolg (Hooijer et al., 2012). Ook Waterland bestaat uit veengrond die gevoelig is voor bodemdaling; hierdoor ontstaat de vraag in hoeverre deze bodemdalingsprocessen invloed hebben op het landschap en de conservering van archeologische monumenten.

In Waterland komen veenterpen voor: door de mens aangelegde historische huisplaatsen in de laaggelegen veengebieden van Nederland, bedoeld om een veilig verblijf mogelijk te maken op een natte en instabiele ondergrond. De oudste veenterpen in Nederland dateren uit circa 600 v.Chr. (Groenewoudt & Van Doesburg, 2018). Veenterpen bestaan uit opgebrachte klei, leem en veenplaggen, vaak gemengd met lagen houtskool en as (Van Doesburg et al., 2010). In tegenstelling tot de grote kuststerpen die voornamelijk in Noord-Nederland voorkomen, zijn deze veenterpen niet aangelegd als een doelbewuste verhoging, maar ontstaan door langdurige opeenvolgende ophogingen van woonplaatsen (Van Doesburg et al., 2010). Hierdoor vormen zij tegenwoordig slechts subtiele onbewoonde verhogingen in het landschap, vaak niet meer dan enkele decimeters hoger dan het omliggende weiland (Figuur 1). Ondanks deze verschillen wordt in dit onderzoek de term *veenterp(-vindplaats)* gehanteerd voor deze archeologische en geomorfologische monumenten, die inzicht bieden in de interactie tussen mens en een watergedomineerd landschap.



Figuur 1: Voorbeeld van een veenterp weergegeven in een LiDAR-afgeleid hoogtemodel (links) en een fotogrammetrische terreinweergave (rechts). Beide laten zien dat een veenterp slechts een lichte verhoging in het landschap vormt.

Tegenwoordig wordt Waterland bedreigd door bodemdaling als gevolg van lage grondwaterstanden, versterkt door klimaatverandering en waterbeheer (Van Ek et al., 2021). Om de huidige conditie van veenterpen te analyseren en de toekomstige risico's van deze archeologische monumenten te begrijpen, werkt het 4D Research Lab (4DRL) van de Universiteit

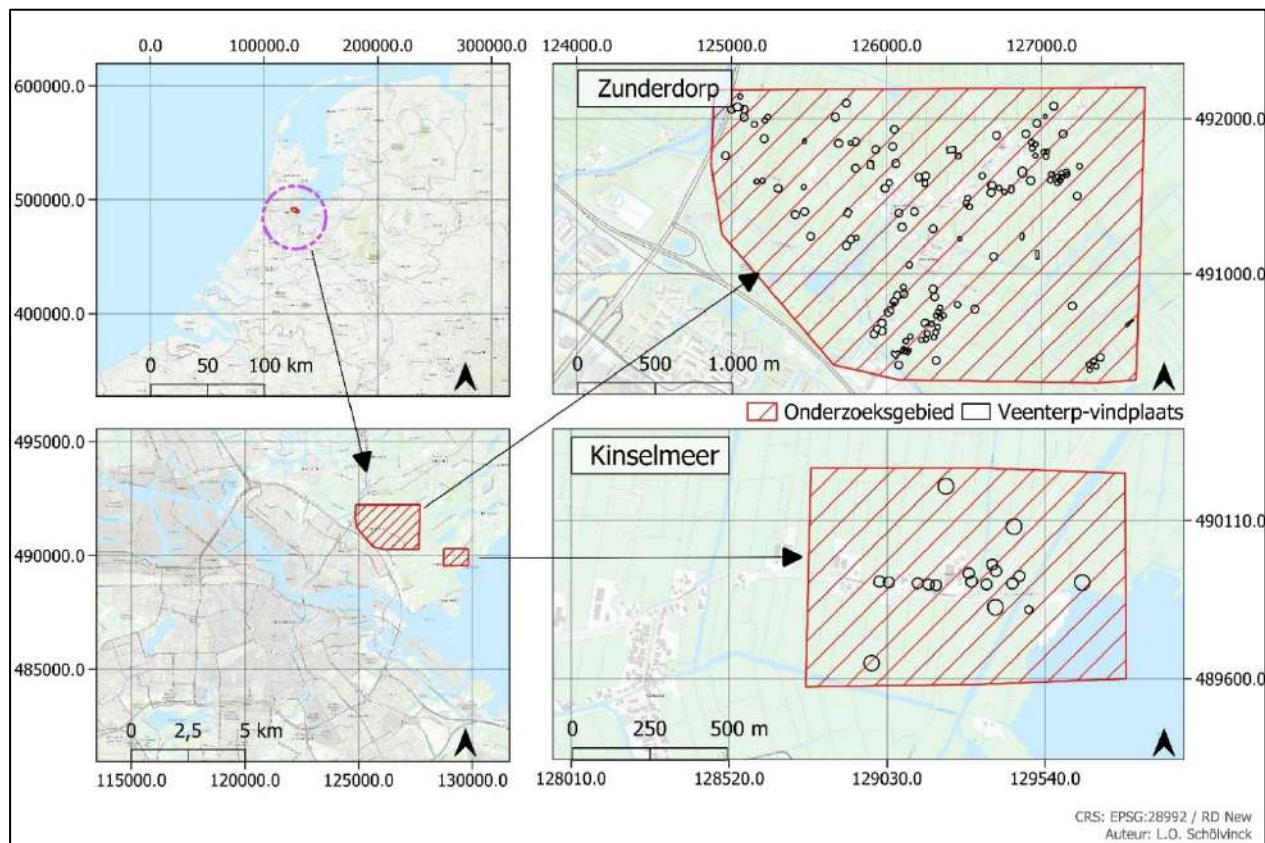
van Amsterdam samen met de Provincie Noord-Holland en de Gemeente Amsterdam aan het combineren van moderne LiDAR-technieken met historische en nieuw verzamelde velddata.

Hoewel de mechanismen achter bodemdaling in veengebieden uitvoerig zijn onderzocht (bijv. Erkens et al.; 2016; Hooijer et al., 2012), is nog beperkt onderzocht hoe deze processen uitwerken op veenterpen. Eerder onderzoek naar bodemdaling in Nederlandse veengebieden laat zien dat zowel de lokale waterhuishouding als de bodemopbouw een belangrijke rol spelen in de snelheid van bodemdaling (Koster et al., 2018; Van Asselen et al., 2018). Zo kan een minerale deklaag de oxidatie van onderliggend veen mogelijk beperken, terwijl een grotere drooglegging juist samenhangt met een versterkte bodemdaling. In hoeverre deze factoren de relatieve bodemdaling van veenterpen beïnvloeden, is echter nog onvoldoende onderzocht.

Van Doesburg et al. (2010) suggereren op basis van onderzoek naar veenterpen in Drenthe dat veenterpvindplaatsen met een dikke klei- of leemdeklaag minder snel inklinken dan veenterpen zonder een dergelijke deklaag. Hierdoor kunnen robuuste veenterpen relatief stabiele verhogingen vormen, terwijl gedegradeerde vindplaatsen minder uitgesproken zichtbaar zijn in het landschap. De relatie tussen deze bodemopbouw en huidige relatieve bodemdalingsverschillen is echter nog niet kwantitatief onderzocht.

Een eerste aanwijzing hiervoor komt uit Schölvink (2025), uitgevoerd binnen de Nationale GI-minor, die concludeerde op basis van een visuele analyse van LiDAR-hoogtemodellen van Waterland dat 87,9% van de ruim honderd veenterpen met een duidelijke waarneembare verhoging in het landschap langzamer lijkt te dalen dan de directe omgeving. Deze observatie is echter gebaseerd op visuele interpretatie en is nog niet statistisch getoetst of gekoppeld aan onderliggende verklarende factoren. Dit onderzoek bouwt hierop voort door verschillen in relatieve bodemdaling kwantitatief te analyseren en te relateren aan bodemopbouw, hydrologische factoren en de aanwezigheid van een veenterp. Hiermee wordt niet alleen onderzocht óf de veenterpen daadwerkelijk langzamer dalen, maar ook welke factoren deze verschillen mogelijk verklaren.

Het onderzoeksgebied bevindt zich in Waterland, ten noordoosten van Amsterdam, en wordt in dit onderzoek opgedeeld in twee deelgebieden: Zunderdorp en Kinselmeer. Deze opdeling is gemaakt omdat de veenterpen ruimtelijk in twee afzonderlijke clusters liggen. Door deze als aparte deelgebieden te beschouwen, konden gebied-specifieke hydrologische omstandigheden worden meegenomen. Figuur 2 toont de locatie van de onderzoeksgebieden, met alle gedocumenteerde veenterpen in het gebied.



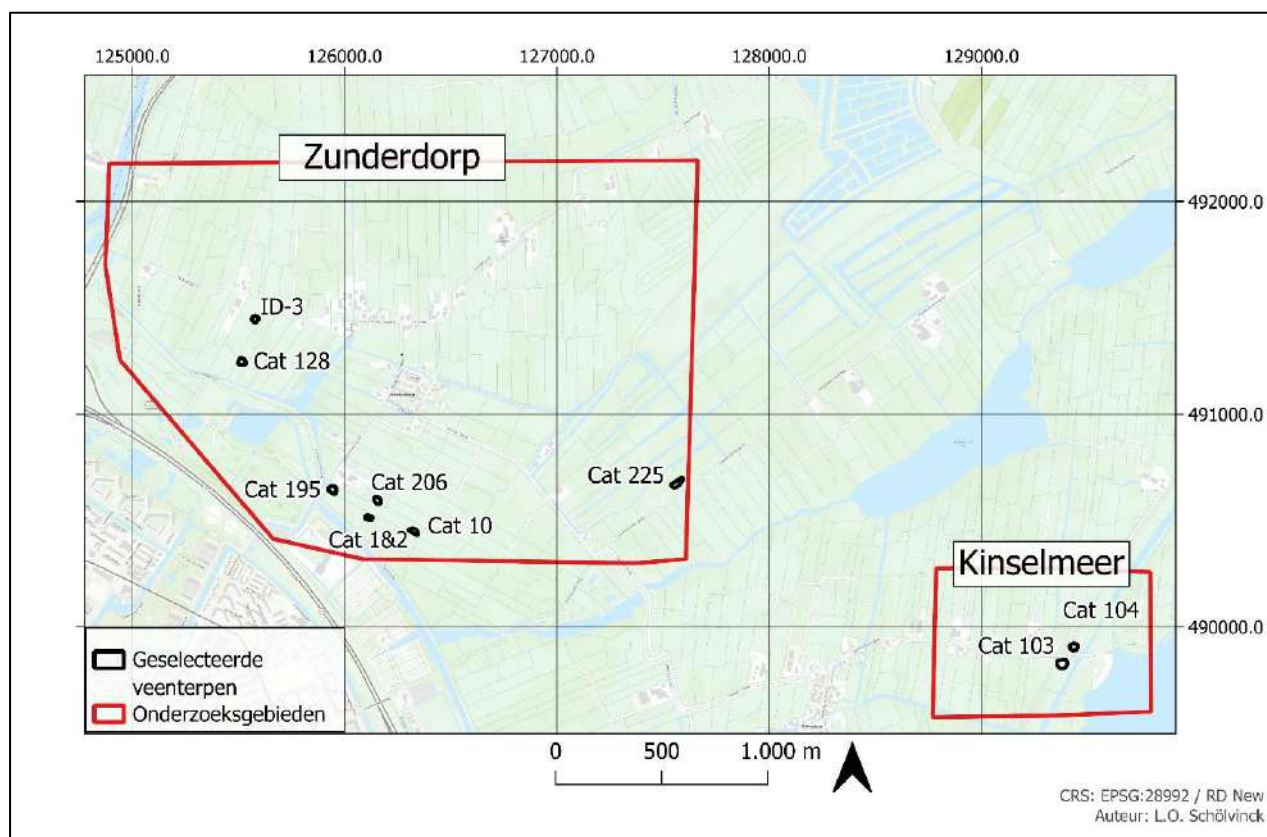
Figuur 2: Locatie van onderzoeksgebieden Zunderdorp en Kinselmeer, met omliggende veenterpvindplaatsen

Dit leidt tot de volgende hoofdvraag, met bijbehorende deelvragen:

In hoeverre kunnen verschillen in bodemopbouw en lokale waterhuishouding de variatie in relatieve bodemdaling van veenterpen in Waterland verklaren?

1. Hoe varieert de relatieve bodemdaling tussen locaties binnen het onderzoeksgebied?
2. In hoeverre verschillen de vindplaatsen in bodemopbouw, met name de dikte van de deklaag?
3. Hoe kan de lokale waterhuishouding binnen het onderzoeksgebied worden gekarakteriseerd aan de hand van peilbesluiten en slootafstand?
4. Welke samenhang bestaat er tussen bodemopbouw, lokale waterhuishouding en relatieve bodemdaling op verschillende ruimtelijke schalen?

Om de deelvragen te beantwoorden, wordt gebruik gemaakt van een combinatie van LiDAR-data, hydrologische data en boorprofielen. De eerste drie deelvragen leveren de benodigde informatie voor de regressieanalyse waarmee in deelvraag 4 de samenhang tussen deze factoren en bodemdaling wordt getoetst. Voor dit onderzoek zijn tien veenterpvindplaatsen onderzocht. Voor acht veenterpen waren boorprofielen reeds beschikbaar, terwijl voor twee aanvullende vindplaatsen in het kader van dit onderzoek nieuwe boringen zijn uitgevoerd. De locatie van deze veenterpen wordt weergegeven in Figuur 3, elk met een unieke identificatiecode.



Figuur 3: Selectie vindplaatsen op basis van beschikbaarheid boorprofielen verdeeld over de onderzoeksgebieden.

2. Theoretisch kader

Dit theoretisch kader beschrijft de processen die ten grondslag liggen aan bodemdaling in veengebieden en de rol van bodemopbouw en waterhuishouding hierin. Eerst worden de dominante mechanismen van bodemdaling besproken, gevolgd door de hydrologische invloeden. Vervolgens worden deze gekoppeld aan de specifieke eigenschappen van veenterpen in het onderzoeksgebied en hun invloed op bodemdaling, waarop de hypothese is geformuleerd.

2.1 Processen van bodemdaling in veengebieden

De bodemdaling in laaggelegen veengebieden is een gevolg van een complex samenspel van fysische, biochemische en antropogene processen (Van Asselen et al., 2018). Van den Akker et al. (2018) tonen aan dat twee derde van de bodemdaling plaatsvindt in de bovenste grondlaag waar zuurstof kan indringen. In deze zone zijn oxidatie en krimp de dominante processen. De resterende een derde van de daling vindt plaats in de permanent verzadigde zone en wordt verklaard door mechanische processen zoals compactie en creep.

Oxidatie treedt op wanneer veen boven de grondwaterstand komt en wordt blootgesteld aan zuurstof. Hierbij breken micro-organismen organisch materiaal af (Van Asselen et al., 2018). Het oxideren van het veen veroorzaakt direct volumeverlies van de bodem (Erkens et al., 2016).

Primaire compactie betreft het volumeverlies van veen door het uitdrijven van poriënwater uit de verzadigde bodem als een gevolg van een toename van de effectieve spanning. Deze spanning neemt toe wanneer het gewicht van de bovenliggende laag op het veen toeneemt, of wanneer de tegendruk van poriënwater afneemt als gevolg van een verlaging van de grondwaterstand (Paul & Barras, 1998).

Creep vormt de secundaire compactiefase, waarbij de veenkorrels zich langzaam reorganiseren, zonder een verdere toename van de spanning (Bakema et al., 2025; Den Haan, 1994). Hoewel creep gelijktijdig optreedt met de primaire compactie, is het een proces dat nog decennia tot eeuwen na de initiële belasting kan doorgaan (van Asselen et al., 2018).

Deze processen laten zien dat verschillen in de ontwatering en belasting leiden tot ruimtelijke variatie in bodemdaling binnen veengebieden.

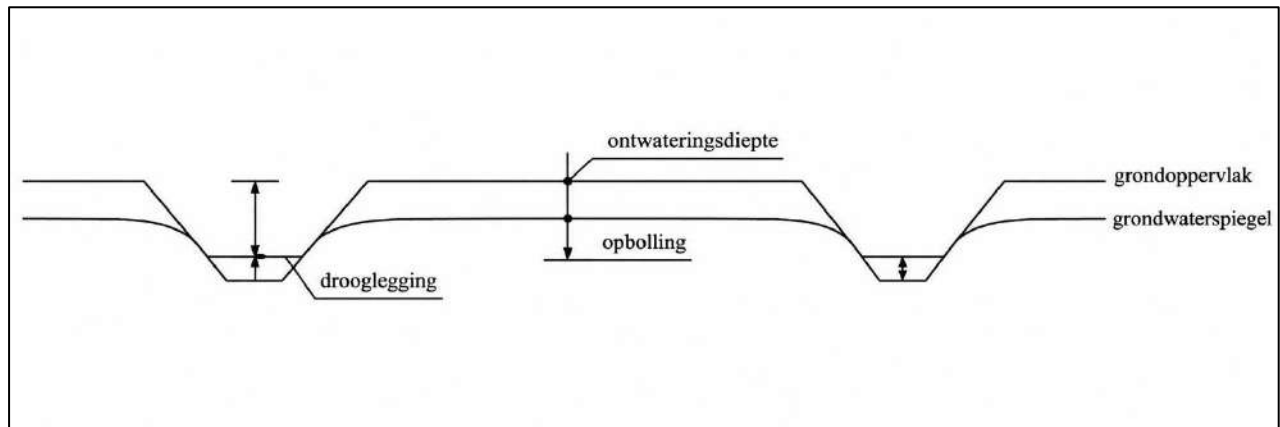
Daarnaast kan het veen gedurende het jaar krimpen en uitzwellen. Deze bewegingen worden veroorzaakt door het uitdrogen en vernatten van veen en klei en zijn omkeerbaar: elke stijging wordt gecompenseerd door een even grote daling (Bakema et al., 2025). Het is daarom van belang dat bij het meten van de bodemdaling dezelfde meetperiodes vergeleken worden om schijntrends te voorkomen.

2.2 Invloed van drooglegging en slootafstand

De lokale grondwaterstand heeft een zeer bepalende rol in het bodemdalingsproces, aangezien deze bepaalt waar de fysische en biochemische mechanismen actief zijn (Massop et al., 2024). Hoewel de lokale grondwaterstand de meest directe invloed heeft op deze processen, wordt in Bakema et al., (2025) drooglegging, vastgelegd in de peilbesluiten, gehanteerd als indicator voor de ontwatering van het veenpakket. Het verband tussen drooglegging en bodemdaling blijkt in deze studie dermate significant dat de drooglegging direct als invoerparameter wordt gebruikt voor het berekenen van historische bodemdaling. *Drooglegging* wordt gedefinieerd als het verschil tussen maaiveld en slootpeil (Figuur 4; Gespreksgroep Hydrologische Terminologie, 1986).

Naast het slootpeil wordt ook de afstand tot sloten gerelateerd aan de variatie in bodemdaling. Afhankelijk van de hydrologische omstandigheden kunnen sloten zowel drainerend als infiltrerend werken, waardoor de afstand naar een sloot invloed heeft op de lokale grondwaterstand (Bakema et al., 2025). In veengebieden kan bovendien *opbolling* optreden, waarbij door de weerstand van de bodem de grondwaterstand in het midden van percelen hoger ligt dan nabij sloten (Figuur 4;

Van der Gaast & Massop, 2007). Hierdoor kan de effectieve ontwateringsdiepte lokaal variëren, waardoor de afstand tot sloten een potentiële ruimtelijke indicator vormt voor verschillen in drooglegging en bodemdaling.



Figuur 4: Schematische weergave van drooglegging en ontwateringsdiepte. Drooglegging wordt gedefinieerd als het verschil tussen maaiveld en slootpeil. De ontwateringsdiepte is het verschil tussen maaiveld en de opbolling. Overgenomen uit Gespreksgroep Hydrologische Terminologie (1986)

2.3 Invloed van bodemopbouw en antropogene ingrepen

Antropogene ingrepen kunnen bovenstaande processen versterken of veroorzaken. Het artificieel verlagen van de grondwaterstand, wat in Nederland reeds ongeveer duizend jaar plaatsvindt (Bakema et al., 2025), leidt tot oxidatie en compactie (Koster et al., 2018). Recent onderzoek van Bakema et al. (2025) stelt dat elke 10 centimeter extra drooglegging gemiddeld leidt tot een toename van bodemdaling van 1,3 mm per jaar. Daarnaast kan ook door de mens aangepaste bodemopbouw invloed hebben op de mate van bodemdaling.

In het onderzoeksgebied komen veenterpen voor: door de mens opgeworpen verhogingen van klei, plaggen en haardresten (Van Doesburg et al., 2010). Van Doesburg et al. (2010) benadrukken dat veenterpen geen uniforme ophogingslichamen vormen, maar sterk variëren in opbouw en samenstelling, afhankelijk van functie en gebruiksgeschiedenis. Deze heterogeniteit kan leiden tot ruimtelijke variatie in de mate waarin veenterpen invloed hebben op bodemdaling.

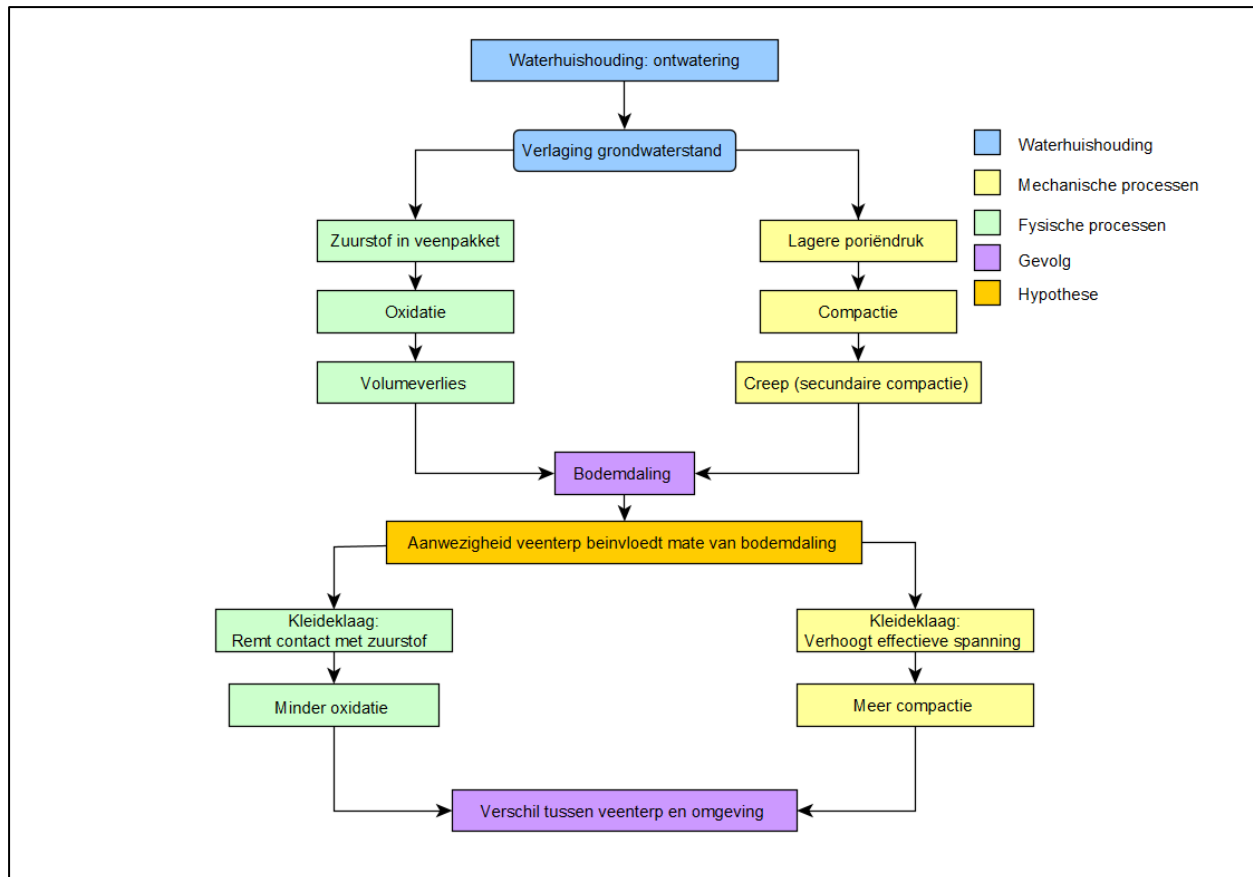
De opgebrachte materialen kunnen mogelijk de ondergrond op twee verschillende manieren beïnvloeden. Enerzijds fungeert een kleilaag als een barrière die de oxidatie van het onderliggende veen remt (Van den Akker et al., 2018). Anderzijds vergroot het extra gewicht van het opgebrachte materiaal voor een toename in effectieve spanning, wat compactie en langdurige creep kan versterken (van Asselen et al., 2018).

2.4 Beschrijving onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied in Waterland kenmerkt zich door een eeuwenoud, door mensen bewoond veenlandschap. De natuurlijke ondergrond bestaat uit het Hollandveen (Formatie van Nieuwkoop), dat bestaat uit pakketten mosveen (oligotroof) tot riet-, zegge en broekveen (eutroof), met een dikte tot cumulatief 8 m (TNO-GDN, 2026b). De natuurlijke aanwezigheid van klei in Waterland, waarmee de veenterpophogingen onder andere zijn gemaakt, is het gevolg van de wisselwerking tussen zeespiegelstijging, kustontwikkeling en veenvorming gedurende het Holoceen. Tijdens perioden van mariene invloeden, waarbij de zee landinwaarts kwam, werden kleiige sedimenten afgezet die lokaal tussen of boven de veenlagen voorkomen (De Mulder et al., 2003). Het veenpakket rust op de Formatie van Naaldwijk, bestaande uit zeer fijn tot grof zand dat lokaal kleiig of siltig is (TNO-GDN, 2026a). Binnen het onderzoeksgebied wordt dit pakket lithologisch als klei beschreven (Bijlage 8, bijvoorbeeld boring WL2025_31 en WL2025_101). Een dwarsdoorsnede van het onderzoeksgebied is opgenomen in Bijlage 1.

2.5 Hypothese

Op basis van de beschreven processen werd verwacht dat de variatie in bodemdaling van veenterpen in Waterland voornamelijk wordt verklaard door verschillen in bodemopbouw, drooglegging en ruimtelijke ligging ten opzichte van sloten. Er werd verwacht dat een grotere lokale drooglegging leidt tot meer bodemdaling, terwijl veenterpen minder bodemdaling vertonen dan hun directe omgeving als gevolg van een beschermend effect van de opgebrachte laag, die mogelijk effecten van compactie deels compenseert. Daarnaast wordt verwacht dat de invloed van sloten mogelijk afneemt met de toenemende afstand. De processen die ten grondslag liggen aan de variatie in bodemdaling zijn samengevat in het conceptueel model (Figuur 5).



Figuur 5: Conceptueel model van de relatie tussen hydrologie, bodemopbouw en bodemdaling van veenterpen.

3. Data

Om de hoofdvraag en deelvragen van dit onderzoek te beantwoorden, is gebruik gemaakt van velddata, remote-sensing data en literatuur. Deze worden in dit hoofdstuk beschreven.

3.1 RAAP-Vindplaatsen

De bekende veenterpen in het gebied zijn vastgelegd in RAAP, Adviesbureau voor archeologie en cultuurhistorie rapport 5. De polygoonlaag met de locatie van deze vindplaatsen (Figuur 2) is beschikbaar gesteld door Bureau Monumenten en Archeologie, Gemeente Amsterdam. De vindplaatsen worden aangeduid met een Cat-code, zoals deze ook in de RAAP-rapporten worden geïdentificeerd.

3.2 AHN-data

Voor het analyseren van de bodemdaling op lokale schaal is AHN2- en AHN5-LiDAR-data gebruikt, die momenteel de grootste beschikbare tijdsspanne binnen het Actueel Hoogtebestand Nederland vertegenwoordigen. Oudere hoogtebestanden konden niet worden gebruikt, omdat deze niet dezelfde ruimtelijke resolutie (0,5 m) bieden als de AHN-data. Een hoge resolutie is binnen dit onderzoek noodzakelijk, aangezien op schaalniveau van individuele veenterpen en percelen wordt gericht.

Het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) is een openbaar beschikbaar digitaal hoogtemodel van Nederland, waarbij maaiveldhoogtes worden weergegeven ten opzichte van NAP. De gebruikte datasets zijn ingewonnen tussen 2011 en 2023 tijdens het bladloze seizoen, dat grofweg van december tot en met maart duurt (*Over Het Programma AHN | AHN*, n.d.). Voordr dit onderzoek worden AHN Digital Terrain Models (DTM's) gebruikt (metadata in Bijlage 2). Deze zijn verkozen boven Digital Surface Models (DSM's), omdat een DSM naast het maaiveld ook objecten op het oppervlak bevat. Hierdoor zijn DTM's geschikter voor het bepalen van hoogteverschillen in het maaiveld.

3.3 Boorprofielen

De basis van de bodemanalyse bestaat uit 38 boorprofielen verdeeld over tien veenterpvindplaatsen. De boorgegevens van acht vindplaatsen zijn afkomstig uit een bestaande dataset van de Gemeente Amsterdam, die voor dit onderzoek beschikbaar is gesteld. Daarnaast zijn binnen dit onderzoek twee aanvullende vindplaatsen onderzocht: Cat 128 en ID-3. Cat 128 betreft een veenterpvindplaats die eerder beschreven is in RAAP-rapport 5. ID-3 betreft één van de veertien potentiële vindplaatsen die op basis van eerder LiDAR-onderzoek zijn geïdentificeerd als landschappelijke anomalieën (Schölvink, 2025). De uitgevoerde boringen wijzen erop dat deze locatie kenmerken vertoont van een mogelijke veenterp, maar nadere datering en archeologisch onderzoek ontbreken vooralsnog. Tabel 1 geeft een overzicht van de onderzochte veenterpen, inclusief deelgebied, aantal boorprofielen en datering. De boorprofielen en bijbehorende locaties zijn opgenomen in respectievelijk Bijlage 8 en Bijlage 3.

Tabel 1: Verdeling veenterpvindplaatsen over de deelgebieden, inclusief aantal boorprofielen en datering.

Vindplaats	Deelgebied	Aantal boorprofielen	Datering
Cat 1	Zunderdorp	4	Voor 1300-1400
Cat 2	Zunderdorp	2	Voor 1300-1400
Cat 10	Zunderdorp	3	Voor 1300
Cat 103	Kinselmeer	4	1300-1600
Cat 104	Kinselmeer	4	1300-1900
Cat 128	Zunderdorp	5	Voor 1300
Cat 195	Zunderdorp	4	1300-1600
Cat 206	Zunderdorp	4	Voor 1300
Cat 225	Zunderdorp	4	Voor 1300-1600
ID-3	Zunderdorp	4	-

3.4 Drooglegging

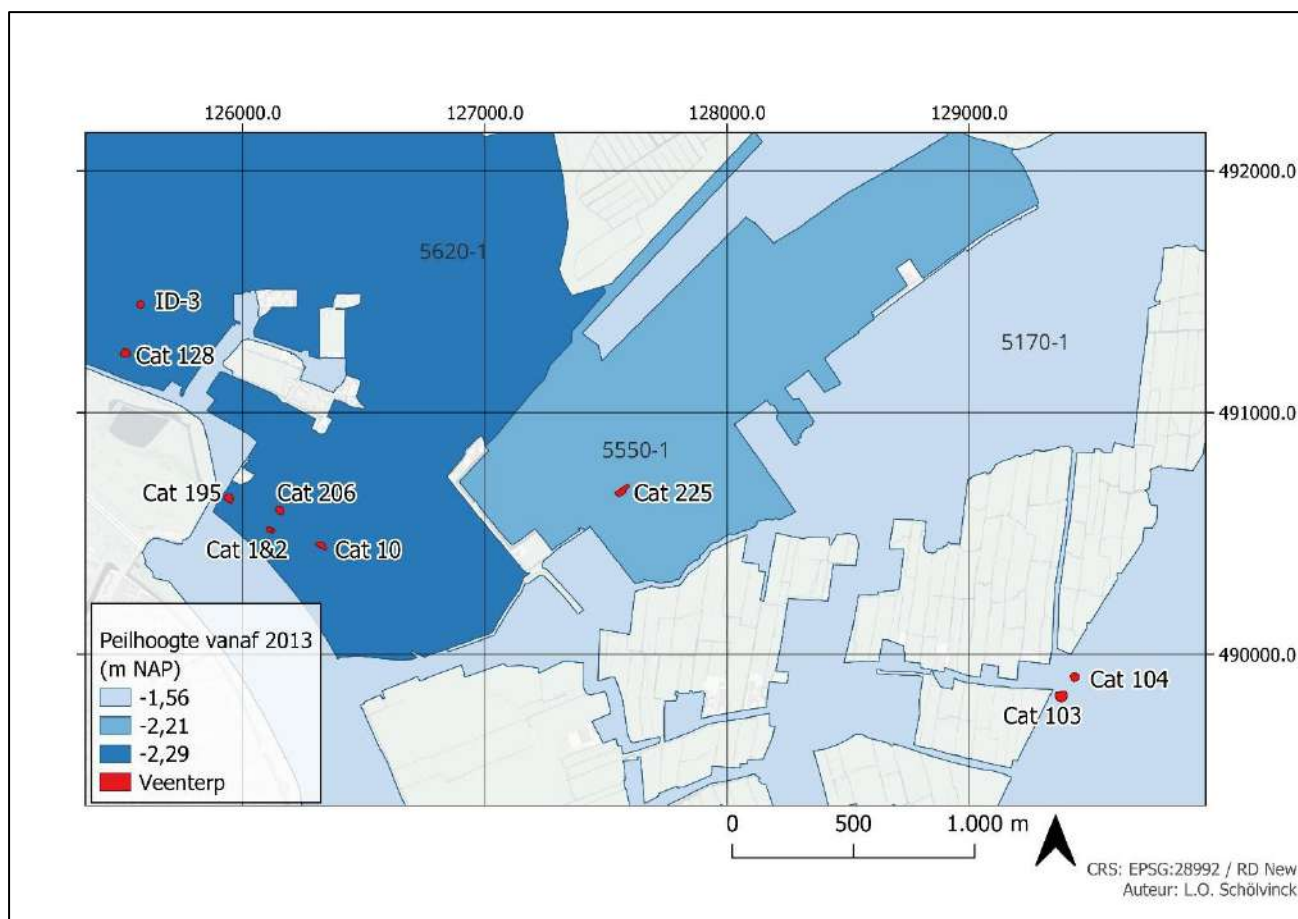
De peilbesluiten in het onderzoeksgebied waaruit de drooglegging is berekend, vallen onder beheer van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en worden uitgedrukt ten opzichte van NAP (*Peilbesluiten | Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier*, n.d.).

Van de peilbesluiten na 2017 is een interactieve kaart beschikbaar op de website van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, die per peilgebied een apart polygoonbestand beschikbaar stelt. Voor elk relevant peilbesluit zijn de GeoJSON ingeladen voor de ruimtelijke koppeling met de veenterpvindplaatsen.

De peilbesluiten die vóór 2017 van kracht waren, vastgelegd op 5 november 2013, zijn via dezelfde website beschikbaar via een PDF-bestand. Tabel 2 toont de peilbesluit-data per veenterpvindplaats die als basis van de droogleggingsdiepte is gebruikt; Figuur 6 brengt de relevante peilgebieden in kaart.

Tabel 2: Verdeling veenterpen over de peilgebieden, inclusief peil vanaf 2017 en 2013.

Vindplaats	Peilgebiednummer	Peil vanaf 2017 (m NAP)	Peil vanaf 2013 (m NAP)
Cat 1, 2, 10, 128, 195, 206 en ID-3.	5620-1	-2,29	-2,29
Cat 103, 104	5170-1	-1,56	-1,56
Cat 225	5550-1	-2,21	-2,21



Figuur 6: Peilgebieden waarin de veenterpen vallen met bijbehorende peilhoogtes vanaf 2013, weergegeven in m NAP. De overige peilgebieden zijn buiten beschouwing gelaten in de figuur.

3.5 Sloten

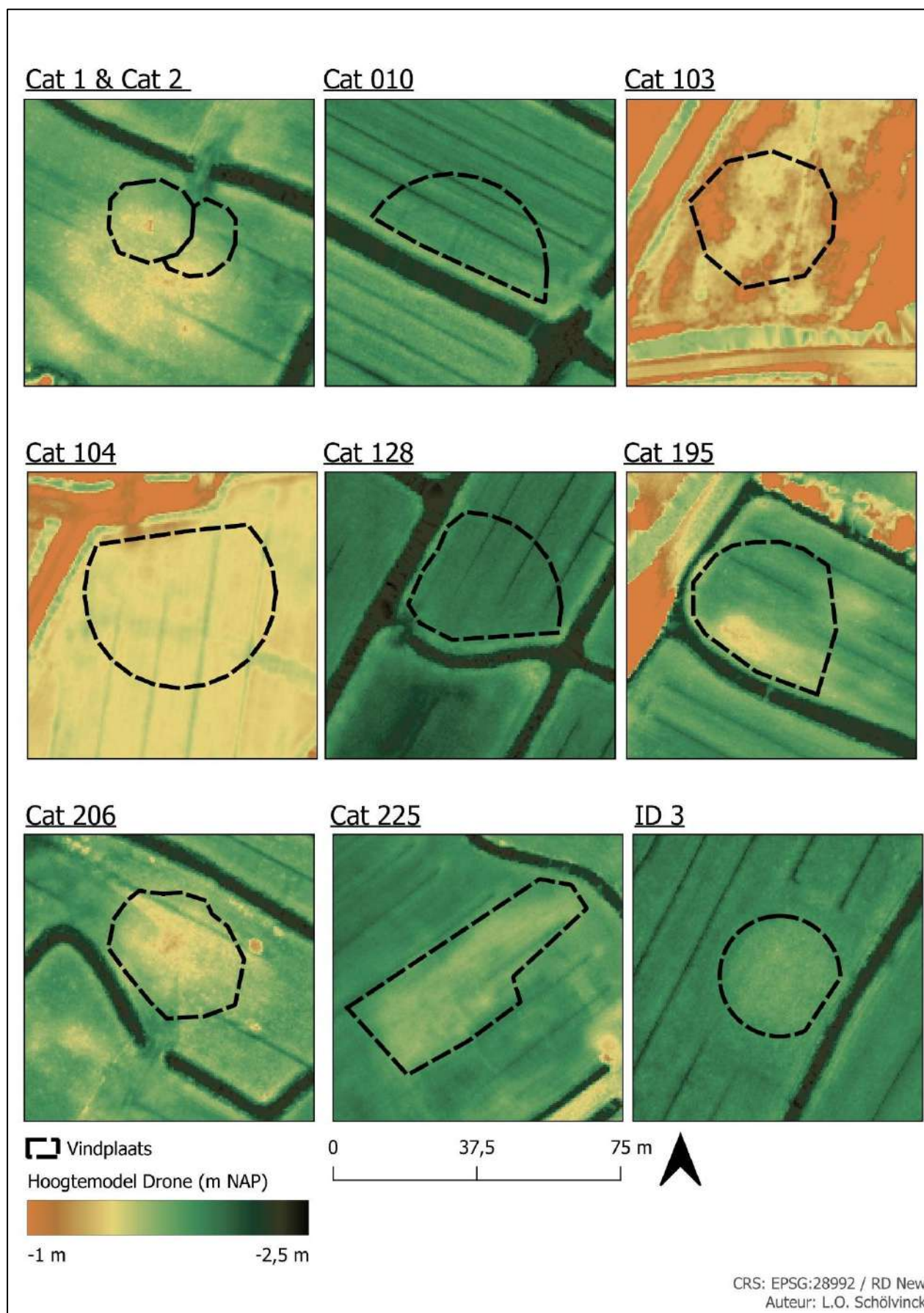
Voor de ruimtelijke analyse van de afstand tot sloten is gebruik gemaakt van de Waterschappen Oppervlaktewateren IMWA dataset. Deze data is gebaseerd op alle waterschappen in Nederland, conform het Informatiemodel Wateren (IMWA) (PDOK, n.d.). De data is verkregen via een Web Feature Service (WFS) en vervolgens in GIS geclipt op het onderzoeksgebied. Binnen de dataset wordt elk waterlichaam gerepresenteerd door een vectorpolygoon.

3.6 Drone-data

Voor een gedetailleerd en recent beeld van de veenterpen is door het 4DRL op 2 en 3 september 2025 een drone (DJI Matrice M350) ingezet om een scan van het gebied te maken. Deze data is door het 4DRL reeds verwerkt en voor vergelijkbaarheid geschaald naar dezelfde ruimtelijke resolutie als de AHN-modellen (0,5 m). De volgende twee datatypes gebruikt worden gebruikt (metadata in Bijlage 2).

- LiDAR-data (Zenmuse L2 scanner), gebruikt als het meest recente hoogtemodel, voor de identificatie van veenterpen;
- Fotogrammetrie-data (Zenmuse P1, RGB), geschikt voor visueel begrip van het onderzoeksgebied en het verklaren van afwijkingen in het hoogtemodel door bijvoorbeeld vegetatie en bebouwing.

In Figuur 7 worden de tien veenterpen die centraal staan in dit onderzoek weergegeven in het drone-hoogtemodel op een uniforme hoogteschaal. De interpretatie dient zich daarbij te richten op de relatieve hoogte ten opzichte van het omliggende perceel, aangezien de veenterpen op verschillende absolute hoogten in het landschap liggen.



Figuur 7: Overzicht van de tien onderzochte veenterpen in het drone-afgeleide hoogtemodel (4DRL) met uniforme hoogteschaal.

4. Methode

In deze sectie worden de methoden beschreven die dienen ter beantwoording van de gepresenteerde hoofd- en deelvragen. Elke GIS-gerelateerde handeling is uitgevoerd in QGIS 3.34.15. Waar variabelen worden gebruikt als input voor de regressieanalyses (deelvraag 4), wordt dit kort vermeld; de exacte statistische modellering wordt toegelicht in Methode 4.4.

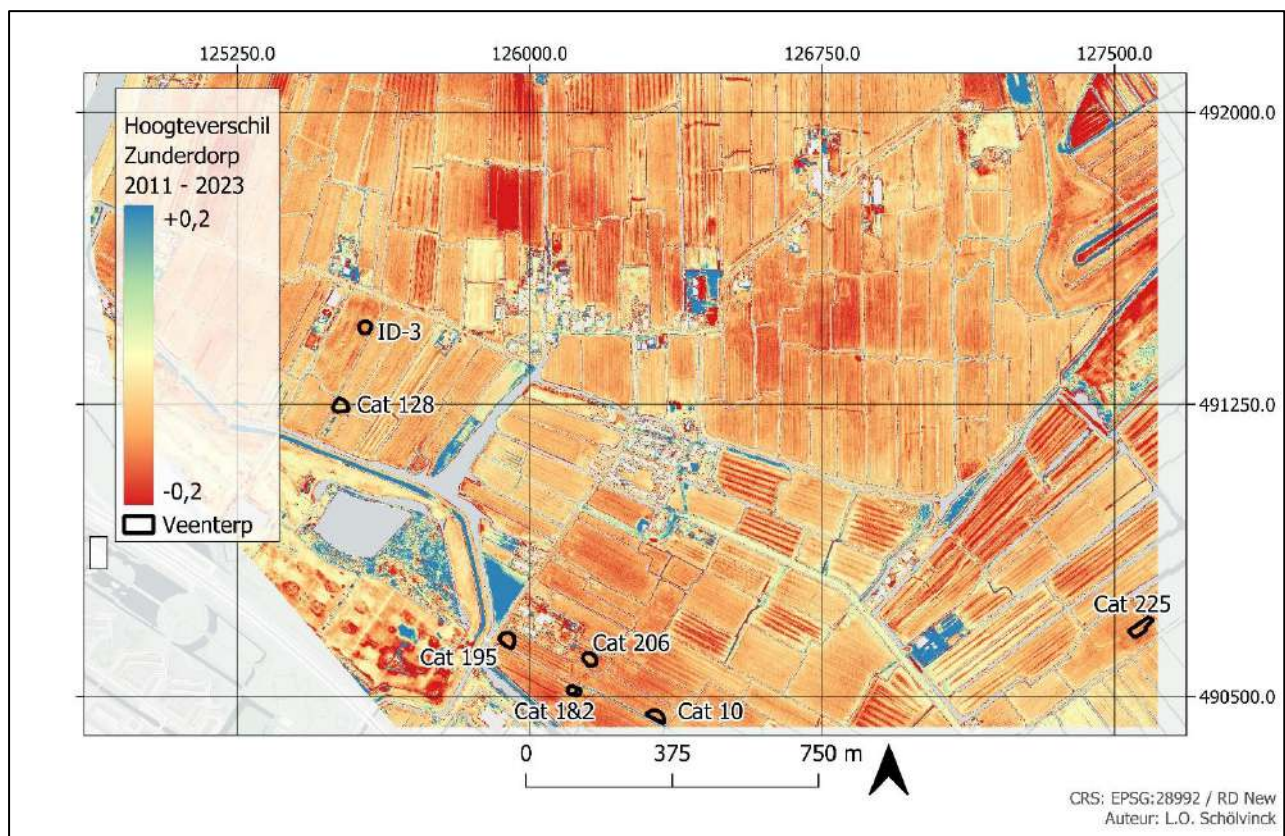
4.1 Kwantificeren van bodemdaling

- *Hoe varieert de relatieve bodemdaling tussen veenterplocaties binnen het onderzoeksgebied?*

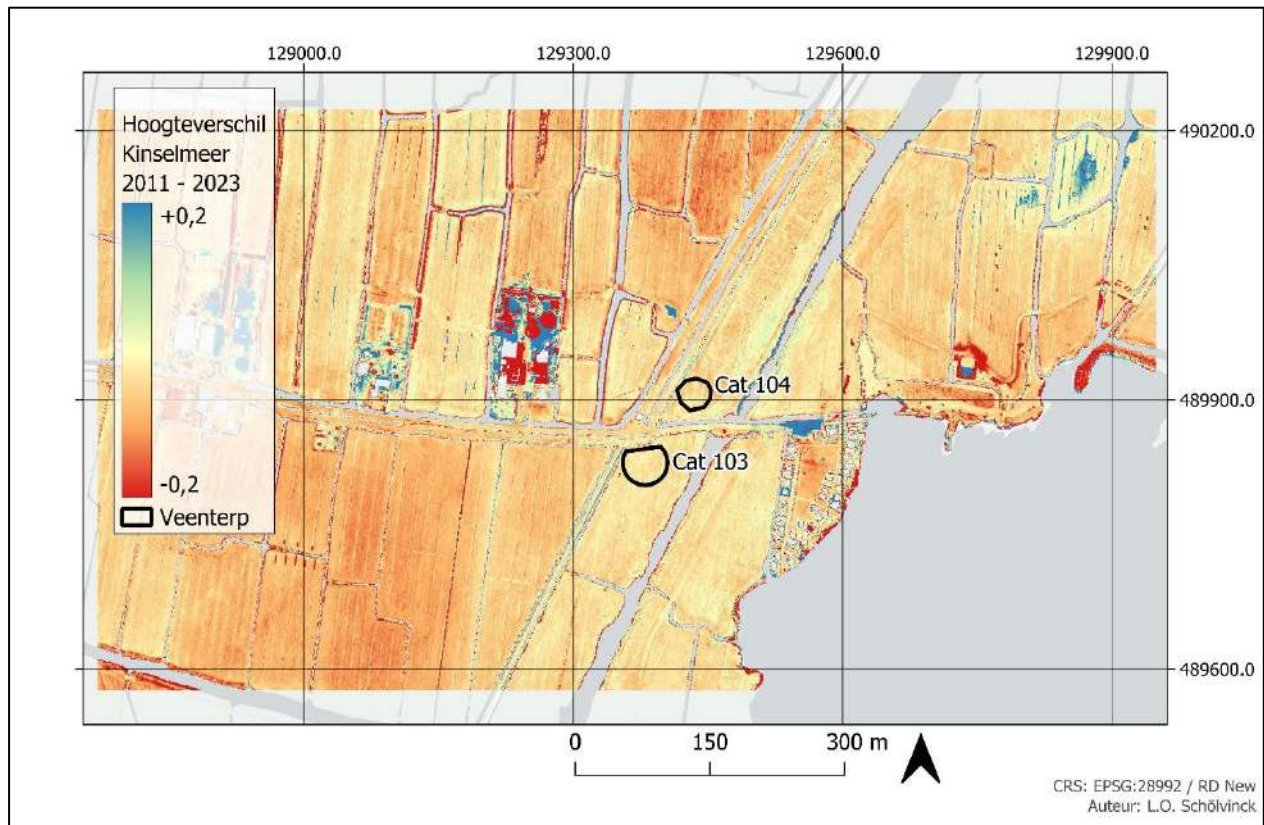
4.1.1 Bodemdalingsraster

Voor het kwantificeren van de relatieve bodemdaling zijn de oudst beschikbare (AHN2; 2011) en meest recente (AHN5; 2023) hoogtemodelrasters met elkaar vergeleken. Voor het creëren van het hoogteverschilraster is bewust gebruik gemaakt van AHN5 in plaats van de drone-gebaseerde LiDAR-data uit 2025. Dit is noodzakelijk om temporele consistentie tussen datasets te waarborgen, aangezien veengronden seizoensgebonden kunnen uitzetten en krimpen, waardoor schijntrends in bodemdaling kunnen ontstaan (Bakema et al., 2025). De AHN-datasets zijn consistent tijdens het bladloze seizoen ingewonnen, terwijl de dronevlucht in september plaatsvond. Door in de QGIS *Rastercalculator* AHN2 af te trekken van AHN5, geeft iedere pixelwaarde het lokale hoogteverschil in meters weer (Figuur 8 en Figuur 9). Een negatieve waarde betekent dat de bodem is gedaald.

Het gebruik van hoogteverschilanalyse op basis van AHN-rasters is eerder toegepast voor het kwantificeren van ruimtelijke hoogteverschillen. Schölvinc (2025) gebruikte deze methode voor de detectie en analyse van veenterpen, terwijl De Koning et al. (2020) de toepasbaarheid aantoonde bij het monitoren van dijkverzakkingen.



Figuur 8: Overzichtskartaal bodemdaling Zunderdorp, afgeleid uit het verschil tussen AHN5 en AHN2 hoogtemodellen.



Figuur 9: Overzichtskartaal bodemdaling Kinselmeer, afgeleid uit het verschil tussen AHN5 en AHN2 hoogtemodellen.

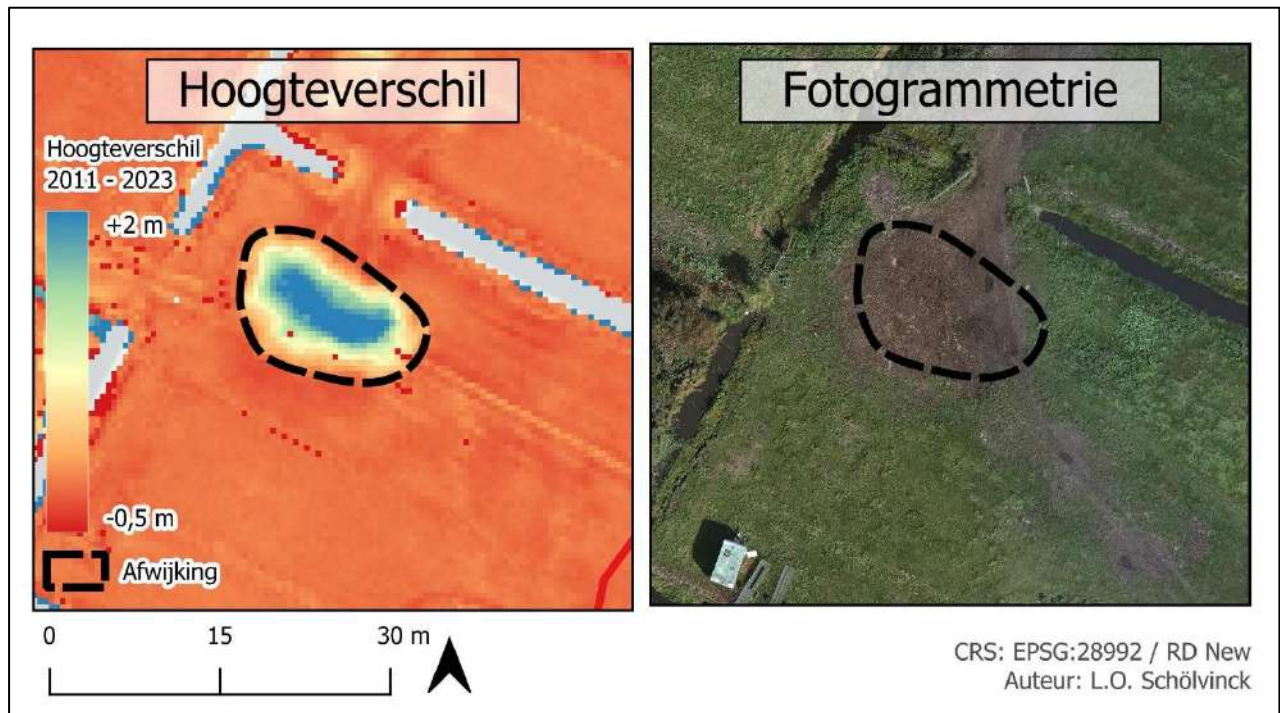
4.1.2 Bodemdaling vindplaatsen en omliggend perceel

Voor de kwantificering van de daling per vindplaats zijn de gemiddelde pixelwaarden van het hoogteverschilraster binnen iedere vindplaatspolygoon berekend met behulp van de *Zonal Statistics*-tool in GIS. Op deze wijze werd voor iedere veenterp een waarde voor de gemiddelde bodemdaling verkregen. Naast inzicht in de verschillende bodemdalingssnelheden van de veenterpen, dient deze waarde ook als afhankelijke variabele in de regressieanalyse.

Binnen het onderzoeksgebied varieert de mate van bodemdaling lokaal tot circa 20 centimeter (Figuur 8, Figuur 9). Daarom is, naast de absolute daling van de afzonderlijke veenterpen, ook onderzocht in hoeverre veenterpen verschillende dalingssnelheden vertonen ten opzichte van hun directe omgeving. Van Doesburg et al. (2010) suggereren tevens dat het hoogteverschil tussen veenterp en omgeving in de loop van de tijd kan toenemen.

Om dit te onderzoeken is per vindplaats handmatig een polygoon opgesteld waarin zowel de veenterp als omliggend weiland zijn opgenomen (Figuur 12 en Figuur 13). Bij het creëren van deze polygonen is ervoor gezorgd dat zij binnen de slootstructuren vallen, zodat percelen onderling konden worden vergeleken. In GIS is op dezelfde wijze als voor de individuele veenterpen, met behulp van *Zonal Statistics*, een gemiddelde bodemdaling per perceel berekend. Hierbij zijn de waarden binnen de veenterpcontouren uitgesloten, zodat enkel de bodemdaling van het perceel rondom een veenterp werd meegenomen. Hierdoor kon een directe vergelijking worden gemaakt tussen de bodemdaling van de veenterp en die van de directe omgeving.

De fotogrammetrische drone-dataset is gebruikt ter controle van het hoogteverschilraster op bijzondere afwijkingen. Alleen binnen het polygoon rondom vindplaats Cat 206 werd een kunstmatige terreinverhoging van circa 1,5 m aangetroffen (Figuur 10). Dit deel van het perceel is daarom uitgesloten van de bodemdalingsberekening.



Figuur 10: Uitgesloten deel van een perceel voor de berekening van de gemiddelde bodemdaling, weergegeven in het hoogteverschilraster (links) en een fotogrammetrische terreinweergave (rechts).

4.2 Bodemopbouw

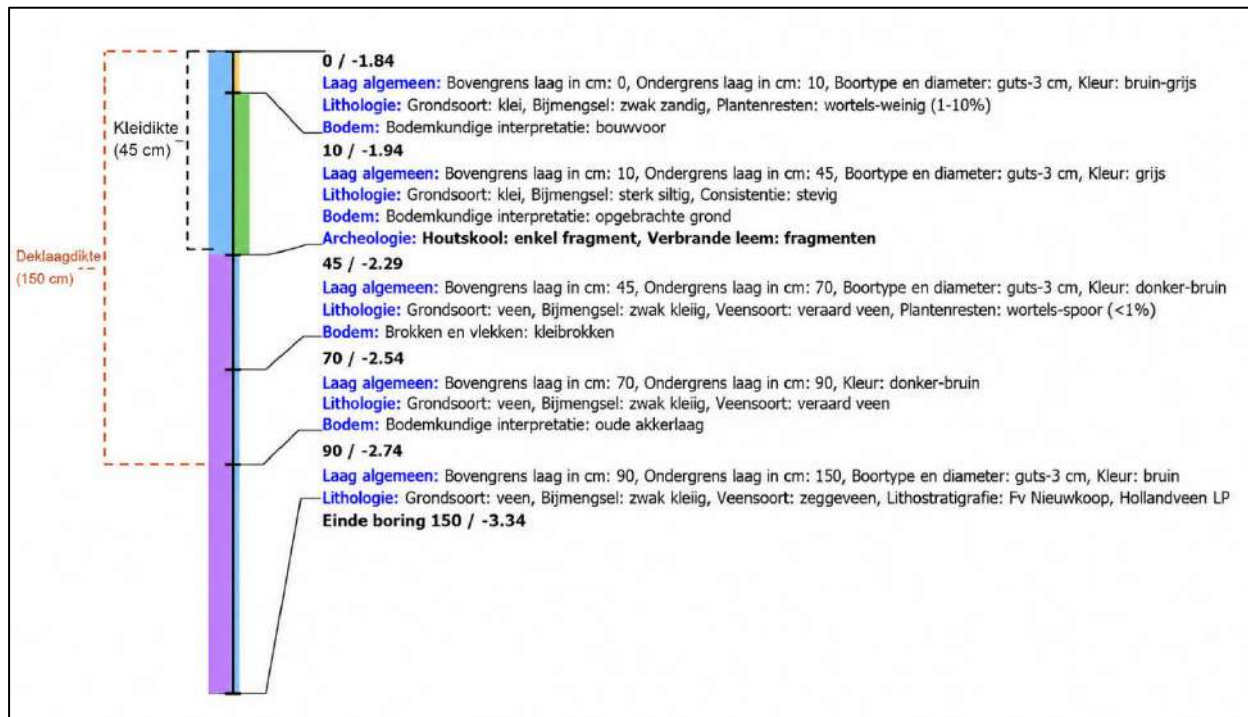
- In hoeverre verschillen de vindplaatsen in bodemopbouw, met name de dikte van de deklaag?

Op veenterp Cat 128 en potentiële veenterp ID-3 zijn ter uitbreiding van de bestaande boorprofielendataset aanvullende veldboringen uitgevoerd met een gutsboor (diameter 3 cm). Verdeeld over deze vindplaatsen zijn negen boringen gezet. De stratigrafie van de boringen is beschreven en verwerkt in Deborah-Software, waarna de bodemopbouwvariabelen zijn afgeleid uit zowel deze nieuwe als de bestaande boorgegevens.

De aanwezigheid van een minerale deklaag kan invloed hebben op de mate van bodemdaling (Van den Akker et al., 2018). Daarom is voor elk van de boorprofielen ($n = 38$) de cumulatieve dikte van kleilagen bepaald (Bijlage 8). Hierbij is uitsluitend gekeken naar stratigrafische lagen met klei als lithologie; kleilig veen is niet als kleilaag geclassificeerd.

Om de gevoeligheid van de resultaten voor deze definitie van kleilagen te toetsen, is aanvullend een alternatieve variabele berekend: *deklaagdikte*. Deze variabele omvat het hele pakket aan antropogene ophooglagen (zoals klei-, as-, en akkerlagen) en veraard veen boven het ongestoorde natuurlijke veen van de Formatie van Nieuwkoop. Door zo de afstand te bepalen tussen het maaiveld en de top van het Hollandveen, wordt de methodologische onzekerheid bij het onderscheiden van klei, kleilig veen en veraard veen omzeild. Deze benadering is noodzakelijk, omdat de Formatie van Nieuwkoop in Waterland van nature kleilig kan zijn (TNO-GDN, 2026b), waardoor de aanwezigheid van klei in een boring niet per definitie duidt op een antropogene ophoging.

Ter illustratie van de bepaling van zowel de kleidikte als de deklaagdikte is een boorprofiel opgenomen, waarin wordt weergegeven hoe beide variabelen zijn afgeleid (Figuur 11).



Figuur 11: Voorbeeld van een bepaling van de kleidikte en deklaagdikte. De lithologisch onderscheiden kleilaag (blauw) wordt gedefinieerd als de lokale kleidikte (45 cm), de deklaagdikte betreft het totale pakket boven de ongestoorde de Formatie van Nieuwkoop (150 cm).

Beide variabelen zijn vervolgens afzonderlijk meegenomen als verklarende variabele in de regressieanalyse. De kleidikte fungeert hierbij als primaire bodemopbouwvariabele binnen het hoofdmodel, terwijl deklaagdikte is gebruikt als alternatieve specificatie.

4.3 Waterhuishouding

- Hoe kan de lokale waterhuishouding binnen het onderzoeksgebied worden gekarakteriseerd aan de hand van peilbesluiten en slootafstand?

4.3.1 Drooglegging

De lokale waterhuishouding heeft een sterke invloed op de mate van bodemdaling in een veengebied (bijv. Bakema et al., 2025; Massop et al., 2024), waarbij met name de mate van drooglegging een rol speelt (Koster et al., 2018). Hoewel de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld (ontwateringsdiepte) de meest directe indicator hiervoor is, worden in dit onderzoek de peilbesluiten gebruikt als maat voor de drooglegging. Binnen het onderzoeksgebied zijn namelijk slechts enkele, veelal niet-actieve grondwaterstandmeters aanwezig. Daarnaast vertegenwoordigen deze metingen slechts een zeer lokale situatie, terwijl het vastgestelde streefpeil een gebiedsdekkende indicatie geeft. Deze keuze komt overeen met het onderzoek van Bakema et al. (2025), waarin eveneens gebruik wordt gemaakt van slootpeilen als indicator voor de ontwatering van het veen.

Aangezien de bodemdalingsmeting betrekking heeft op de periode 2011-2023, is het peilbesluit uit 2013 gebruikt als representatieve benadering van de drooglegging, omdat dit peil het grootste deel van de analyseperiode van kracht was en sindsdien niet is gewijzigd (Tabel 2).

Hoewel het slootpeil binnen een peilgebied één constante is, varieert de maaiveldhoogte lokaal. Hierdoor varieert ook de drooglegging, gedefinieerd als het hoogteverschil tussen maaiveld en slootpeil (Figuur 4). Om deze variabele ruimtelijk te kwantificeren, zijn de peilgebieden met bijbehorende peilhoogtes in meter NAP als polygonen ingeladen. Vervolgens zijn deze polygonen omgezet naar een raster met dezelfde resolutie als het AHN2-hoogtemodel (0,5 m). Dit peilraster is vervolgens afgetrokken van het AHN2-maaiveldmodel in de *Rastercalculator*, zodat per pixel de

drooglegging is berekend (Figuur 14 en Figuur 15). Ondanks dat de AHN2-opname uit 2011 dateert, wordt de combinatie van AHN2 en het peilbesluit uit 2013 als een representatieve benadering van de initiële drooglegging beschouwd.

Vanuit het droogleggingsraster is per meetpunt de gemiddelde drooglegging bepaald, met behulp van *Zonal Statistics*. Deze gemiddelden dienen als verklarende variabele voor de regressieanalyse.

4.3.2 Afstand naar sloot

Hoewel de drooglegging is afgeleid van lokale peilbesluiten, wordt de daadwerkelijke ontwateringsdiepte in de praktijk mede bepaald door lokale factoren, zoals de doorlatendheid van het veen en afstand tot sloten (Figuur 4; Bakema et al., 2025; Van der Gaast & Massop, 2007). Om deze lokale variatie te benaderen, is naast drooglegging ook de slootafstand als verklarende variabele meegenomen in de regressieanalyse.

De slootafstand is berekend met behulp van de *Shortest Line Between Features*-tool in QGIS. Deze tool berekent de minimale Euclidische afstand tot de dichtstbijzijnde slootpolygoon. De hiervoor gebruikte slootpolygoonen zijn afkomstig uit de Waterschappen Oppervlaktewateren IMWA dataset. Deze afstand per meetpunt is vervolgens als variabele in de regressieanalyse gebruikt.

4.4 Samenhang

- *Welke samenhang bestaat tussen bodemopbouw, lokale waterhuishouding en relatieve bodemdaling op verschillende ruimtelijke schalen?*

Om de samenhang tussen bodemopbouw, lokale waterhuishouding en relatieve bodemdaling te bepalen, is een analyse op twee schaalniveaus uitgevoerd: op veenterpniveau en perceelniveau. Deze keuze is gebaseerd op verschillen in data-beschikbaarheid en uit de ruimtelijke schaal van processen. Gedetailleerde informatie over bodemopbouw is namelijk uitsluitend beschikbaar voor de veenterpvindplaatsen op basis van boorprofielen, waardoor analyse van lithologische variatie beperkt blijft tot dit schaalniveau. Tegelijkertijd vereist het kwantificeren van relatieve verschillen in bodemdaling tussen veenterpen en hun directe omgeving een grotere ruimtelijke dekking, die alleen op perceelniveau kan worden gerealiseerd. Alle modellen zijn geschat met Ordinary Least Squares (OLS) regressie in Python 3; de scripts zijn opgenomen in Bijlage 6 (veenterpniveau) en Bijlage 7 (Perceelniveau). Voor alle variabelen is uitgegaan van een lineair verband, tenzij anders aangegeven.

4.4.1 Veenterpniveau

Voor de regressie op veenterpniveau is de verklaring van de variatie in bodemdaling tussen veenterpvindplaatsen onderling getoetst. De variabelen voor de regressie zijn opgenomen uit Methodes 4.1 tot en met 4.3.

- Afhankelijke variabele
 - Gemiddelde bodemdaling per vindplaats ($n = 10$)
- Verklarende variabelen
 - Gemiddelde drooglegging
 - Gemiddelde kleidikte
 - Gemiddelde deklaagdikte

In totaal zijn vijf modellen (model 1.1 tot en met 1.5) opgesteld. De drie verklarende variabelen zijn eerst afzonderlijk getoetst met enkelvoudige lineaire regressie (OLS). Vervolgens is een multivariate regressieanalyse uitgevoerd waarin de variabelen gezamenlijk zijn opgenomen. Omdat kleidikte onderdeel uitmaakt van de totale deklaagdikte, is er sprake van mogelijke multicollineariteit tussen beide variabelen. In het hoofdmodel (1.4) is daarom gekozen voor

kleidikte, aangezien deze het meest direct aansluit bij de literatuur over de invloed van klei op bodemdaling. Als aanvullende analyse is in model 1.5 deklaagdikte opgenomen.

4.4.2 Perceelniveau

Op perceelniveau is de relatie tussen bodemdaling en hydrologische variabelen geanalyseerd met een grotere steekproef van willekeurig gegenereerde meetpunten. In het model zijn slootafstand en drooglegging opgenomen als verklarende variabelen. Daarnaast is een binaire veenterpdummy opgenomen om te toetsen of de aanwezigheid van een veenterp samenhangt met verschillen in bodemdaling.

Aanvullend zijn perceel-specifieke effecten meegenomen door Perceel-ID, genummerd naar de veenterp die perceel het omvat, als categorische variabele op te nemen in het regressiemodel. Hiermee wordt gecontroleerd voor ruimtelijke verschillen tussen percelen (fixed effects), zoals lokale bodemopbouw of landschappelijke kenmerken.

Voor deze statistische analyse zijn de perceelpolygonen gebruikt die eerder zijn opgesteld in de methode voor het kwantificeren van de bodemdaling. Omdat veenterpen Cat 1 en Cat 2 binnen hetzelfde perceel vallen en bovendien aangrenzend zijn, worden deze samengevoegd tot één vindplaats met één perceel. Het overkoepelende perceel is aangeduid als Perceel-ID 123. Binnen elk van deze negen percelen zijn 500 willekeurige steekproefpunten gegenereerd, met een minimale onderlinge afstand van 1,5 m om ruimtelijke spreiding te garanderen. Rond ieder steekproefpunt is een buffer van 1 m gebruikt om de uit te lezen rasterwaarden te middelen en daarmee lokale ruis te verminderen. Voor elk gebufferd steekproefpunt zijn de volgende variabelen uitgelezen.

- Afhankelijke variabele
 - Bodemdaling per steekproefpunt ($n = 5000$)
- Verklarende variabelen
 - Drooglegging
 - Euclidische afstand tot dichtstbijzijnde sloot
 - Veenterp dummy (1 = op veenterp, 0 = buiten veenterp)
 - Perceel-ID

De analyse is opgedeeld in zeven modellen (model 2.1 tot en met 2.7). Eerst is een multivariaat OLS-model geschat met drooglegging, slootafstand en terpdummy als verklarende variabelen. Vervolgens is dit model uitgebreid met perceel-specifieke effecten. Daarnaast zijn aanvullende slootanalyses uitgevoerd om mogelijke niet-lineaire slooteffecten te onderzoeken. Hierbij is een logaritmische transformatie toegepast en is een afzonderlijke analyse uitgevoerd voor meetpunten binnen 5 meter van de sloot om te testen of effecten met name optreden nabij de slootrand. Tot slot is een interactiemodel geschat om te toetsen of het effect van drooglegging verschilt op veenterpen en omliggende percelen.

5. Resultaten

5.1 Kwantificeren bodemdaling

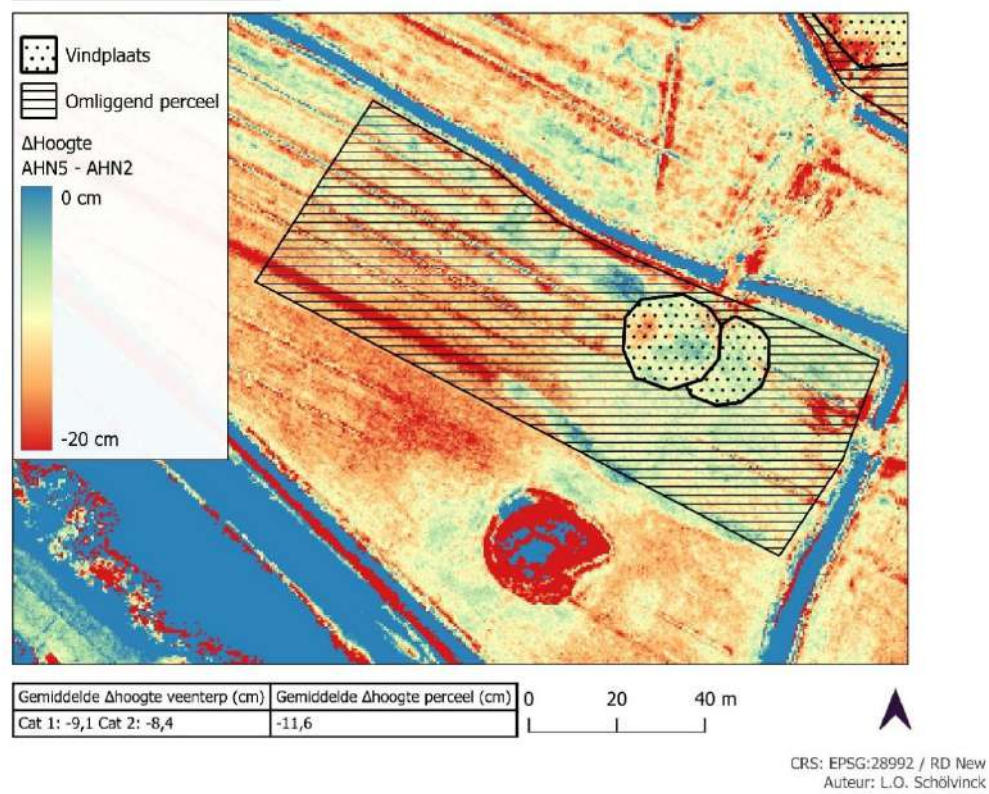
De gemiddelde bodemdaling per veenterpvindplaats en omliggend perceel tussen de periode 2011 en 2023 (AHN2 en AHN5) wordt weergegeven in Tabel 3. Deze gemiddelden dienen als afhankelijke variabelen in de regressieanalyse op veenterpniveau. De gemiddelde daling van de veenterpen varieert tussen -2,9 cm en -10,8 cm, wat wijst op duidelijke verschillen tussen de locaties. De laagste mate van bodemdaling wordt gevonden bij Cat 103 en Cat 104, terwijl Cat 195, Cat 206 en Cat 225 tot de sterkst dalende locaties behoren. Cat 103 en Cat 104, de minst zakkende veenterpen, liggen beide in onderzoeksgebied Kinselmeer en lijken minder snel te zakken dan de veenterpen rondom Zunderdorp. Figuur 12 en Figuur 13 tonen een voorbeeld van de bodemdalingsanalyse uit respectievelijk Zunderdorp en Kinselmeer. De overige zeven figuren zijn opgenomen in Bijlage 4.

Bij negen van de tien vindplaatsen was de bodemdaling op de veenterp kleiner dan in het omliggende perceel. Een negatieve waarde in Tabel 3 betekent dat de veenterp langzamer zakt dan zijn directe omgeving. Het grootste verschil werd aangetroffen bij Cat 2, waar de veenterp 3,2 cm minder snel daalde dan het omliggende perceel. Ook bij Cat 1, Cat 206 en Cat 195 was de relatieve bodemdaling op de veenterp duidelijk lager dan die in de directe omgeving. Slechts één locatie vormde een uitzondering: Cat 104 daalde 1,1 cm meer dan het omliggend perceel. Bij Cat 225 en ID-3 waren de verschillen beperkt (0,2 cm).

Tabel 3: Gemiddelde bodemdaling tussen 2011 en 2023 binnen veenterpen en in de omliggende percelen.

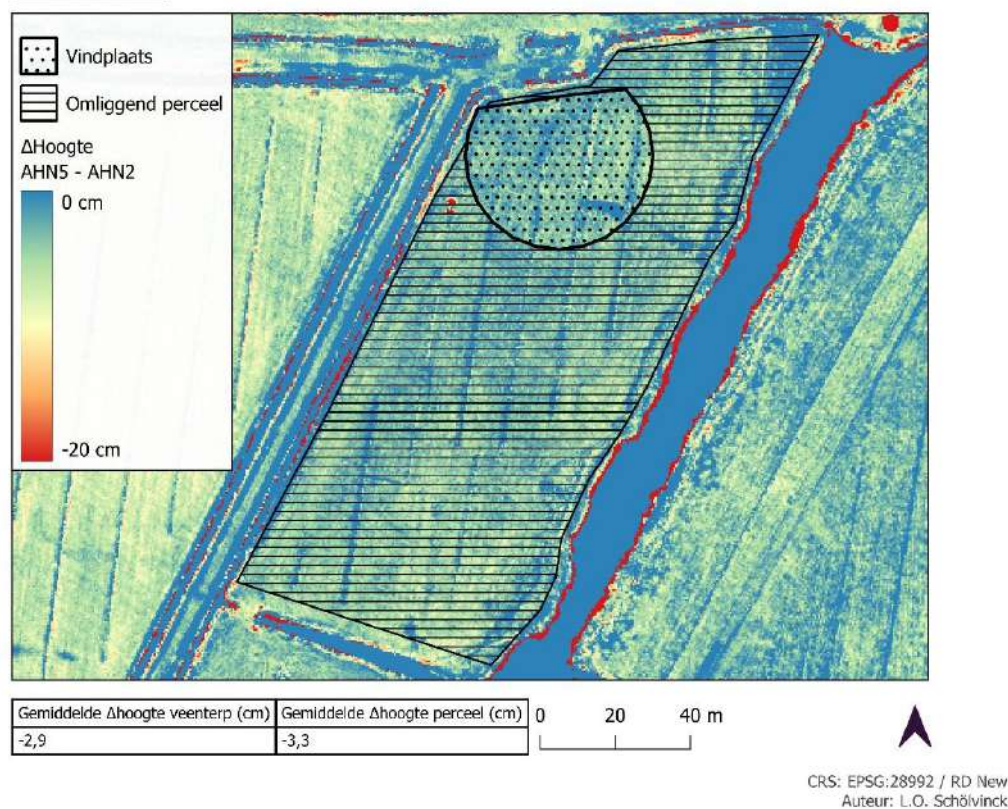
	Cat 1	Cat 2	Cat 10	Cat 103	Cat 104	Cat 128	Cat 195	Cat 206	Cat 225	ID 3
Daling veenterp (cm)	-9,1	-8,4	-10,4	-2,9	-3,7	-4,5	-10,5	-10,8	-10,4	-10,1
Daling perceel (cm)	-11,6	-11,6	-11,3	-3,3	-2,6	-6,1	-12,3	-12,9	-10,6	-10,3
Δ (perceel-veenterp)	-2,5	-3,2	-0,9	-0,4	1,1	-1,6	-1,8	-2,1	-0,2	-0,2

Cat 1 & Cat 2



Figuur 12: Gemiddelde bodemdaling veenterpen en omliggend perceel Cat 1 & Cat 2

Cat 103



Figuur 13: Gemiddelde bodemdaling veenterp en omliggend perceel Cat 103

5.2 Bodemopbouw

Voor elke boring zijn de kleidikte en de totale deklaagdikte vastgesteld. Vervolgens zijn van deze waarden de gemiddelden berekend per veenterp (Tabel 4). Daarnaast is voor beide variabelen de standaardafwijking (SD) bepaald. Zowel de gemiddelde deklaagdikte als kleidikte zijn per veenterp zeer verschillend. De gemiddelde kleidikte varieert tussen 7,6 cm (Cat 103) en 95 cm (Cat 195). De totale deklaagdikte varieert tussen 57 cm (Cat 128) en 227,5 cm (Cat 195). De standaardafwijkingen wijzen op aanzienlijke spreiding binnen de veenterpen. De volledige analyse per boorprofiel waaruit de gemiddelden per vindplaats zijn berekend, is opgenomen in Bijlage 5. De gemiddelden dienen als verklarende variabelen in de regressieanalyse op veenterpniveau.

Tabel 4: Gemiddelde kleidikte en deklaagdikte per veenterp, inclusief standaardafwijkingen, gebaseerd op de boorprofielen (Bijlage 8)

Vindplaats	Gemiddelde kleidikte (cm)	SD kleidikte	Gemiddelde deklaagdikte (cm)	SD deklaagdikte
Cat 1	45,33	27,18	116,25	46,61
Cat 2	35,67	16,26	127,50	53,00
Cat 10	21,67	15,28	61,67	16,07
Cat 103	7,60	10,55	82,40	36,90
Cat 104	31,25	19,74	108,75	46,08
Cat 128	46,40	13,69	57,00	10,95
Cat 195	95,00	91,56	227,50	111,24
Cat 206	23,00	16,10	181,50	57,79
Cat 225	25,50	16,94	105,00	18,26
ID-3	53,25	11,35	88,75	18,87

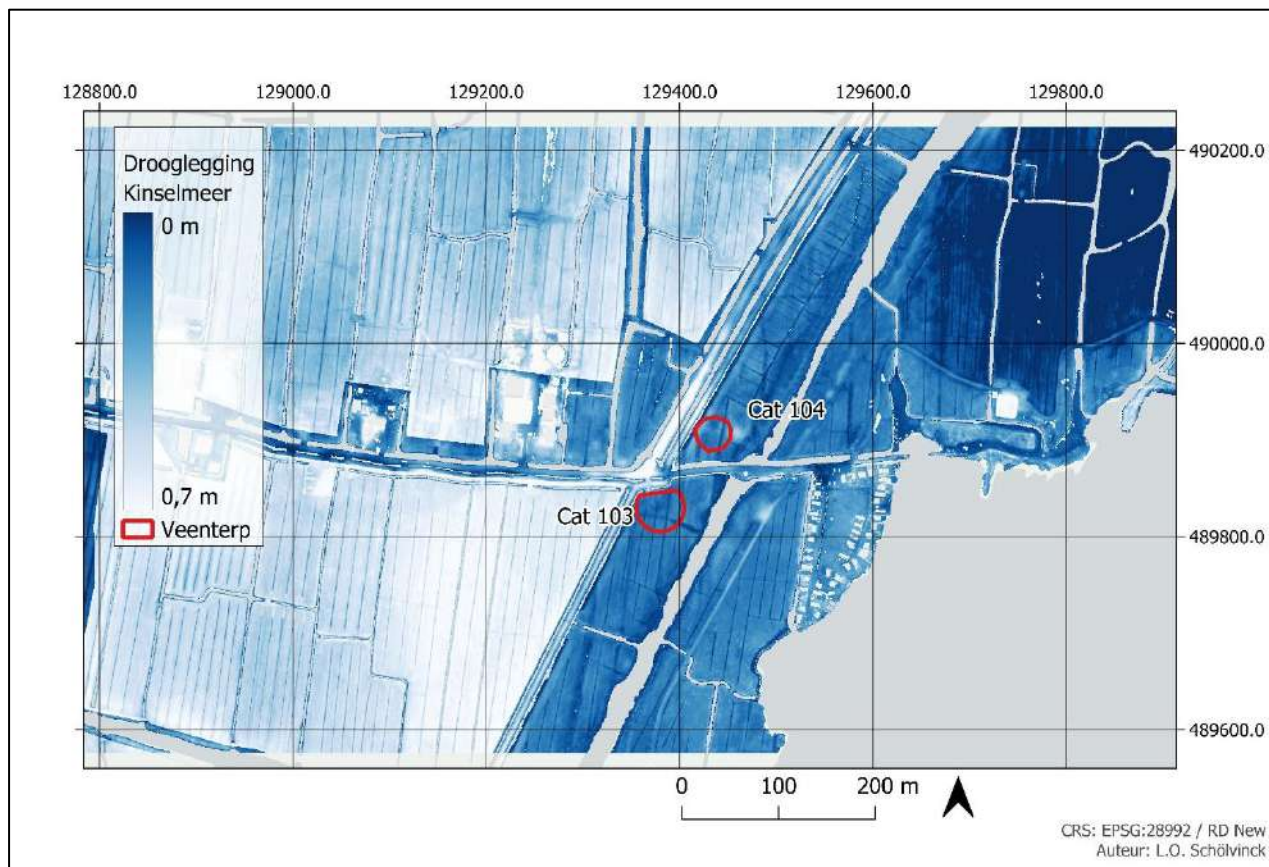
5.3 Drooglegging

De drooglegging is berekend op basis van de peilbesluiten uit 2013 en AHN2. Figuur 13 en Figuur 14 tonen de overzichtskaarten van de drooglegging binnen de twee onderzoeksgebieden. Hieruit blijkt dat met name het gebied grenzend aan het Kinselmeer een relatief lage drooglegging heeft.

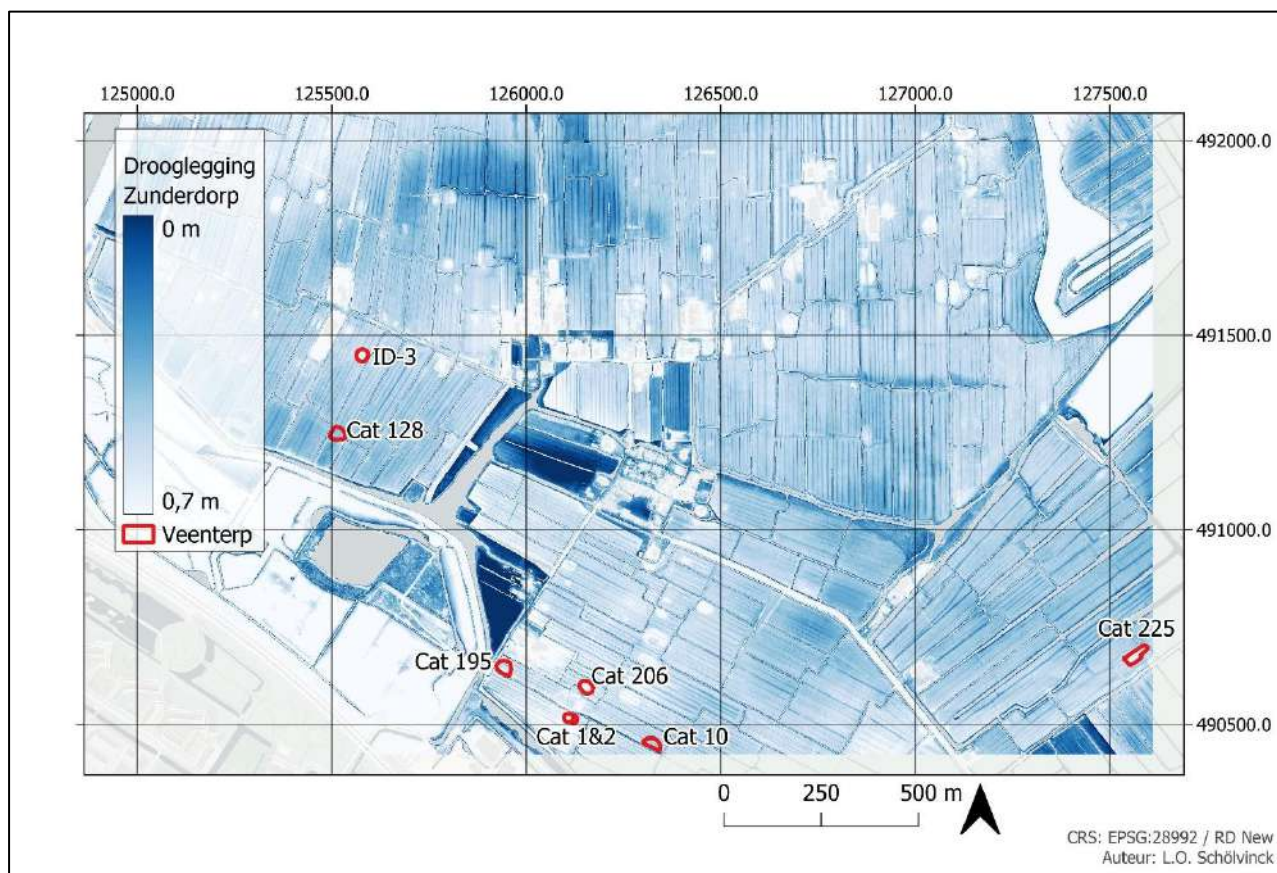
Voor iedere veenterpvindplaats is de gemiddelde drooglegging berekend (Tabel 5). De laagste gemiddelde droogleggingen worden aangetroffen bij Cat 103 en Cat 104, van respectievelijk 16,48 en 21,24 centimeter. De hoogste gemiddelde drooglegging wordt gevonden bij Cat 206, Cat 1 en Cat 2 (respectievelijk 80,00, 77,92 en 73,58 cm). De gemiddelde drooglegging per vindplaats dient als verklarende variabele in de veenterpregressie.

Tabel 5: Gemiddelde drooglegging per veenterp gebaseerd op het droogleggingsraster

	Cat 1	Cat 2	Cat 10	Cat 103	Cat 104	Cat 128	Cat 195	Cat 206	Cat 225	ID 3
Gemiddelde drooglegging (cm)	77,92	73,58	52,52	16,48	21,24	42,59	63,76	80,00	63,57	69,66



Figuur 14: Drooglegging in het onderzoeksgebied Kinselmeer, berekend als het hoogteverschil tussen maaiveld (AHN2) en de peilbesluiten uit 2013.



Figuur 15: Drooglegging in het onderzoeksgebied Zunderdorp, berekend als het hoogteverschil tussen maaiveld (AHN2) en de peilbesluiten uit 2013.

5.4 Samenhang

Om de relatie tussen bodemdaling en de verklarende variabelen te onderzoeken zijn regressies uitgevoerd op twee verschillende schaalniveaus: veenterpniveau en perceelniveau. De individuele modellen zijn genummerd en voor de volledige output met onder andere exacte p-waarden wordt verwezen naar Bijlage 6 (veenterpniveau) en Bijlage 7 (perceelniveau). De bodemdaling wordt in elke analyse uitgedrukt als negatief getal: hoe meer daling, hoe negatiever het getal. Alle waarden zijn voor gebruik geschaald naar dezelfde meeteenheid. Resultaten worden als statistisch significant beschouwd bij een significantieniveau van $\alpha = 0,05$.

5.4.1 Veenterpniveau

Op veenterpniveau zijn vijf modellen geschat waarin drooglegging, kleidikte en deklaagdikte zowel enkelvoudig als in een multivariaat model worden getoetst. De resultaten van deze modellen zijn weergegeven in Tabel 6 en worden in deze sectie besproken.

*Tabel 6: OLS-regressieresultaten op veenterpniveau voor de verklaring van variatie in bodemdaling aan de hand van drooglegging en bodemopbouw (kleidikte en deklaagdikte). Coëfficiënten (β) worden weergegeven met standaardfouten tussen haakjes. Significantie is weergegeven met * $p < 0,10$, ** $p < 0,05$ en *** $p < 0,01$. Model fit wordt weergegeven met R^2*

Variabele	Model 1.1	Model 1.2	Model 1.3	Model 1.4	Model 1.5
Drooglegging	-0,1192*** (0,024)			-0,1172*** (0,028)	-0,1142*** (0,029)
Kleidikte		-0,0436 (0,043)		-0,0056 (0,026)	
Deklaagdikte			-0,0263 (0,019)		-0,0048 (0,012)
Observaties	10	10	10	10	10
R^2	0,749	0,113	0,199	0,751	0,755

De enkelvoudige regressie (model 1.1) laat zien dat drooglegging een sterke en significante relatie heeft met bodemdaling: het verklaart 74,9 % van de variantie ($R^2 = 0,749$, $p = 0,001$). Dit duidt erop dat veenterpen met een grotere drooglegging gemiddeld een sterkere bodemdaling vertonen. De kleidikte (model 1.2) en deklaagdikte (model 1.3) vertonen in de enkelvoudige analyse een negatieve, maar niet statistisch significante relatie met bodemdaling. Deze modellen verklaren respectievelijk 11,3% ($R^2 = 0,113$) en 19,9% van de bodemdaling ($R^2 = 0,199$).

In het multivariate model 1.4, waarin kleidikte en drooglegging gezamenlijk zijn opgenomen, wordt 75,1% van de variantie in bodemdaling verklaard ($R^2 = 0,751$). Binnen dit model blijkt alleen drooglegging een significante voorspeller van bodemdaling ($p = 0,004$), terwijl kleidikte geen significant effect vertoont ($p = 0,837$). De coëfficiënt van drooglegging ($\beta = -0,1172$) geeft aan dat een toename van de drooglegging met 1 cm leidt tot een toename in bodemdaling (meer negatieve waarde) van 0,1172 cm.

Ter controle is een alternatief multivariaat model geschat waarbij kleidikte werd vervangen door deklaagdikte. Dit leidde niet tot wezenlijke andere resultaten; ook in dit model was de deklaagdikte niet significant ($p = 0,705$). het model verklaarde 75,5% van de variantie ($R^2 = 0,755$).

5.4.2 Perceelniveau

Op perceelniveau zijn zes regressiemodellen geschat waarin hydrologische en landschappelijke variabelen worden gecombineerd. Daarnaast zijn interactieanalyses uitgevoerd om de stabiliteit van de gevonden verbanden te toetsen. De resultaten van deze modellen zijn weergegeven in Tabel 7 en worden in deze sectie besproken.

*Tabel 7: OLS regressieresultaten op perceelniveau voor de verklaring van variatie in bodemdaling door drooglegging, slootafstand en de ligging (Terpdummy). Coëfficiënten (β) worden weergegeven met standaardfouten tussen haakjes. Perceel-fixed effects zijn opgenomen waar aangegeven. Modellen 2.3-2.5 betreffen alternatieve specificaties van de slootafstandvariabele (lineair, log-getransformeerd en enkel het effect binnen de eerste 5 meter vanaf de slootrand). Significantie is weergegeven met * $p < 0,10$, ** $p < 0,05$ en *** $p < 0,01$. Model fit wordt weergegeven met R^2*

Variabele	Model 2.1	Model 2.2	Model 2.3	Model 2.4	Model 2.5	Model 2.6
Drooglegging	-0,1685*** (0,003)	-0,0607*** (0,008)			-0,1685*** (0,003)	-0,0861*** (0,009)
Slootafstand	-0,0002*** (6,09e-05)	-0,0003*** (6,51e-05)	-6,76e-05 (7,52e-05)		-0,0002** (7,03e-05)	
Terpdummy	0,0221*** (0,002)	0,0165*** (0,002)			0,0221*** (0,002)	-0,0129*** (0,005)
Slootafstand log- transformatie				0,0030*** (0,001)		
Slootafstand eerste 5m					0,0005 (0,002)	
Drooglegging x Terpdummy						0,0568*** (0,009)
Perceel-fixed effects	Nee	Ja	Nee	Nee	Nee	Ja
Observaties	4496	4496	4496	4496	4496	4496
R^2	0,346	0,420	< 0,001	0,002	0,346	0,423

Model 2.1: Lineair multivariaat model

Het multivariate basismodel 2.1 waarin drooglegging, slootafstand en de terpdummy zijn opgenomen, verklaart 34,6% van de variantie in bodemdaling ($R^2 = 0,346$). Drooglegging blijkt de belangrijkste variabele binnen dit model ($\beta = -0,1685$; $p < 0,001$), wat aangeeft dat een grotere drooglegging samenhangt met sterkere bodemdaling (meer negatieve waarden). De terpdummy is positief en significant ($\beta = 0,0221$; $p < 0,001$), wat erop wijst dat een meetpunt binnen een veenterp gemiddeld minder is gedaald. Slootafstand is statistisch significant, maar het effect is klein ($\beta = -0,0002$; $p = 0,007$).

Model 2.2: Lineair multivariaat model + perceel effecten

Het toevoegen van perceel-specifieke fixed-effects (model 2.2) verhoogd de verklaarde variantie tot 42% ($R^2 = 0,420$). Eén perceel (ID-3) is als referentieperceel opgenomen. De coëfficiënten van de overige percelen geven de afwijking in bodemdaling weer ten opzichte van dit referentieperceel. De coëfficiënten laten zien dat elk perceel een andere dalingssnelheid heeft ten opzichte van het referentieperceel. Binnen dit model blijven zowel drooglegging, slootafstand en de terpdummy statistisch significant. De afname in grootte van de coëfficiënten voor zowel de drooglegging als de

terpdummy variabele, suggereert dat een deel van het oorspronkelijke effect samenhangt met perceel-specifieke kenmerken die niet volledig worden beschreven door de opgenomen variabelen.

Model 2.3, 2.4 en 2.5: Slootafstandanalyse

Hoewel de slootafstand in zowel model 2.1 en 2.2 statistisch significant blijkt te zijn, laat een enkelvoudige lineaire regressie (model 2.3) zien dat de relatie met bodemdaling op zichzelf zeer zwak is ($R^2 \approx 0.000$, $p = 0,369$). Een additionele log-getransformeerde variant (model 2.4) toont wel een statistisch significant verband ($p = 0,003$), maar verklaart slechts 0,2% van de variantie ($R^2 = 0,002$) en levert geen verbetering ten opzichte van het multivariate model 2.1 waarin slootafstand als lineaire variabele is opgenomen.

Een aanvullende analyse naar een mogelijk lokaal effect binnen de eerste 5 meter van sloten (model 2.5) laat geen extra effect zien van deze zone ($p = 0,804$). Het model blijft vrijwel identiek aan het basismodel (2.1), wat suggereert dat er geen lokaal slooteffect aanwezig is binnen deze afstand ten opzichte van het perceel.

Gezamenlijk duidt dit erop dat slootafstand zelfstandig slechts een beperkt verklarend mechanisme representeert als zelfstandige variabele en mogelijk fungeert als ruimtelijke proxy voor onderliggende hydrologische processen.

Model 2.6: Interactieanalyse

Om te onderzoeken of het significante effect van drooglegging verschilt tussen veenterpen en niet-veenterpen, is een interactiemodel geschat (model 2.6). Hieruit blijkt dat de interactieterm tussen drooglegging en de terpdummy positief en significant is ($\beta = 0,0568$ $p < 0,001$). Dit betekent dat het negatieve effect van drooglegging op bodemdaling afzwakt binnen veenterpcontouren. Met andere woorden: een toename in drooglegging leidt nog steeds tot meer bodemdaling, maar het effect is minder sterk binnen veenterpen dan in de omliggende gebieden. Een dergelijke significante interactie tussen slootafstand en veenterp werd niet gevonden.