

Resultaten KIMA monitoring dunslibcompartimenten Marker Wadden

fysica en chemie



Resultaten KIMA monitoring dunslibcompartimenten Marker Wadden fysica en chemie

Auteur(s)

Jill Hanssen

Naomi Lamers

Thijs van Kessel

Resultaten KIMA monitoring dunslibcompartimenten Marker Wadden fysica en chemie

Opdrachtgever	lenW
Contactpersoon	Sacha de Rijk
Referenties	KPP projectcode WN08 2019
Trefwoorden	Bouwen met slib, Markermeer, monitoring, Marker Wadden

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	24-11-2022
Projectnummer	11208072-002
Document ID	11208072-002-ZWS-0003
Pagina's	60
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

1.0	Jill Hanssen	
	Naomi Lamers	
	Thijs van Kessel	

Deze pagina is niet voor publicatie

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Jill Hanssen	Wouter van der Star	Bianca Peters	
	Naomi Lamers			
	Thijs van Kessel			

Samenvatting

In het kader van kennisontwikkeling over de aanleg van de Markerwadden is het Kennis- en Innovatieprogramma Marker Wadden (KIMA) uitgevoerd. Een onderdeel hiervan is het onderzoek over bouwen met slib. Hiertoe heeft in speciaal hiertoe aangelegde onderzoekscompartimenten (totale grootte 10 ha) monitoring plaatsgevonden naar het consolidatiegedrag van slib en de invloed van peilbeheer, korstvorming en vegetatieontwikkeling hierop. Het huidige rapport beschrijft de resultaten van de fysische en chemische aspecten van dit onderzoek. Het vegetatie-onderzoek is gerapporteerd door Princen en Kalle (2022) in een flankerend rapport.

De compartimenten zijn gevuld met ca. 440.000 m³ Holocene klei met lage initiële dichtheid verdeeld over 2 vulslagen. Hierbij treedt segregatie op, waarbij zandiger materiaal m.n. terecht komt dichtbij het vulpunt en het slibrijke sediment met een hoger organisch gehalte over een grote afstand uitstroomt. De consolidatie van de sliblaag is gevolgd door o.a. het meten van de hoogteontwikkeling en de dichtheidsprofielen. Hierbij is de hoogteontwikkeling gecorrigeerd voor de zetting van de ondergrond die ook optreedt.

Van de oorspronkelijke gemiddelde laagdikte van ca. 4.4 m slib (dikte niet uniform en in 2 slagen aangebracht) is na ruim 2 jaar nog ca. 2.7 m over, d.w.z. 1.7 m zakking t.g.v. sedimentatie en consolidatie, inclusief een kleine bijdrage van ca. 0.1 m zetting van de ondergrond. De consolidatiesnelheid neemt in het tweede jaar sterk af. Dichtheidsprofielen ontwikkelen zich dan nauwelijks meer. De gemiddelde bulkdichtheid in de slibrijke profielen van de compartimenten is ca. 1400 kg/m³. Dit betekent dat meer slib nodig is voor de vulling van de compartimenten dan waarvoor bij het ontwerp is uitgegaan. Grosso modo levert 1 m³ klei uit de Markermeerbodem niet meer dan ca. 1 m³ stabiel substraat voor wetlandontwikkeling.

De metingen laten in het eerste jaar een sterke toename van de bodemsterkte zien, maar verdere toename is beperkt. Na het afdalen van water ontwikkelt zich door verdamping snel een stevige korst die begaanbaar is voor watervogels en waarop vegetatie zich kan vestigen mits ook aan andere voorwaarden is voldaan (Princen en Kalle, 2022).

Doordat 2 van de 3 deelcompartimenten grotendeels permanent onder water staan, was minder onderzoek mogelijk naar de invloed van vegetatie en korstvorming op het consolidatieproces. Op basis van de wel beschikbare metingen lijkt de invloed van vegetatie beperkt, de eerste jaren is consolidatie een dominant fysisch gedreven proces. De invloed van korstvorming is wel belangrijk, want hierdoor wordt de aandrijvende kracht voor consolidatie in de verzadigde sliblaag onder de korst vergroot door bovenbelasting en bovendien treedt in de korst door uitdroging een sterke verdichting op. Met peilbeheer is de consolidatiesnelheid dus gedeeltelijk stuurbaar, waarbij een hoog waterpeil de consolidatie vertraagt en een laag peil de consolidatie versnelt.

Qua chemische samenstelling is het sediment dat is toegepast in de dunslibdepots homogeen. De variatie in chemische samenstelling van de sliblaag wordt verklaard door de zand-slib verhouding. Ook het poriewater vertoont direct na vulling weinig verschillen. Over de periode 2019 – 2021 neemt de concentratie chloride geleidelijk af en tegelijkertijd neemt de sulfaat-bicarbonaat concentratie toe. In de bovenste 20 cm van de sliblaag wordt het organisch materiaal afgebroken door verschillende oxidanten, onder de 20 cm zijn er sulfaat reducerende omstandigheden. In deze toplaag treden diverse redoxreacties op en vormen zich redox-fronten. Hierbij worden diverse precipitaten gevormd, die potentieel kunnen bijdragen aan verdere sterkteontwikkeling.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Beschrijving van de onderzoekscompartimenten	9
3	Monitoringplan	10
3.1	Bemonstering fysische eigenschappen	11
3.2	Chemie poriewater	12
3.3	Chemische samenstelling: vaste stof	13
3.4	Sterkte-metingen	14
3.4.1	Hand vane	14
3.4.2	Rheotune metingen	14
3.5	Zetting ondergrond. zakbakens (4 stuks) en zakking maaiveld (12 locaties)	14
3.5.1	Zakbakens	15
3.6	Waterdruk	15
3.6.1	Peilbuizen:	15
3.6.2	Waterspanningsmeter	16
4	Vullen van compartimenten, peilbeheer en overige activiteiten	17
5	Resultaten monitoring	20
5.1	Bemonstering fysica	20
5.1.1	Gradiënten korrelgrootte	20
5.1.2	Ontwikkeling profielen dichtheid, droge stof, watergehalte en LOI	21
5.1.3	Atterbergse grenzen	24
5.2	Bemonstering chemie	25
5.2.1	Vaste stof	25
5.2.1.1	Driehoeksdiagrammen	25
5.2.1.2	Al ₂ O ₃ plots	27
5.2.2	Poriewater	29
5.2.2.1	Compartiment 1	30
5.2.2.2	Compartiment 2	31
5.2.2.3	Compartiment 3	31
5.2.3	Verticale profielen samenstelling poriewater	32
5.2.3.1	Compartiment 1	33
5.2.3.2	Compartiment 2	36
5.2.3.3	Compartiment 3	40
5.2.4	Reducerende metalen	42
5.2.5	Conclusies	43
5.3	In situ sterkte- en dichtheidsmetingen	44
5.3.1	Ongedraineerde schuifsterkte	44
5.3.2	Dichtheid	47
5.4	Resultaten zakking sliblaag en ondergrond	48

5.4.1	Zakbakens	48
5.4.2	Hoogteligging bovenkant sliblaag	50
5.4.3	Ontwikkeling waterpeil	50
5.4.4	Ruimtelijk dekkende bathymetrische survey	50
5.5	Resultaten waterdrukken	51
5.5.1	Drukmeters	51
5.5.2	Piëzometer	52
6	Discussie	54
6.1	Vullen	54
6.2	Consolidatie sliblaag	55
6.3	Zetting ondergrond	56
7	Conclusies	57
8	Referenties	59

1 Inleiding

In het kader van kennisontwikkeling over de aanleg van de Markerwadden is het Kennis- en Innovatieprogramma Marker Wadden (KIMA) uitgevoerd. KIMA beslaat drie thema's, namelijk:

1. Bouwen met slib en zand;
2. Ecosysteem van waarde;
3. Adaptive governance.

Thema 1 'Bouwen met slib en zand' bestaat uit drie onderdelen, namelijk:

1. Leren over bouwen met slib in de compartimenten van Marker Wadden
2. De dynamiek van de zandige randen van Marker Wadden
3. De invloed van Marker Wadden op de slibdynamiek en troebelheid van het Markermeer

De huidige rapportage gaat over het eerste onderdeel van Thema 1. Het tweede en derde deel wordt in een andere rapporten beschreven (Steezel et al., 2021 en Hanssen et al., 2022). Voor een overzicht en samenvatting van al het onderzoek, inclusief het onderzoek aan thema's 2 en 3 wordt verwezen naar het KIMA syntheserapport (De Rijk et al., 2022).

Bij aanvang van KIMA zijn diverse onderzoeksvragen geformuleerd. Voor het eerste onderdeel van thema 1 luidde de hoofdvraag:

'Hoe kun je zo effectief mogelijk met slib en zand nieuwe habitats met natuurwaarden creëren?'

In aanvulling hierop zijn er ook deelvragen geformuleerd. Deze waren voor het eerste onderdeel:

- 1.1: *Wat is invloed van de vul- of opbouwmethode, dichtheid en samenstelling en vegetatieontwikkeling op de consolidatie en draagkrachtontwikkeling van het slib?*
- 1.2: *Hoe ontwikkelen we op de toplaag vegetatiebedekking met helofyten met voldoende biologische draagkracht?*

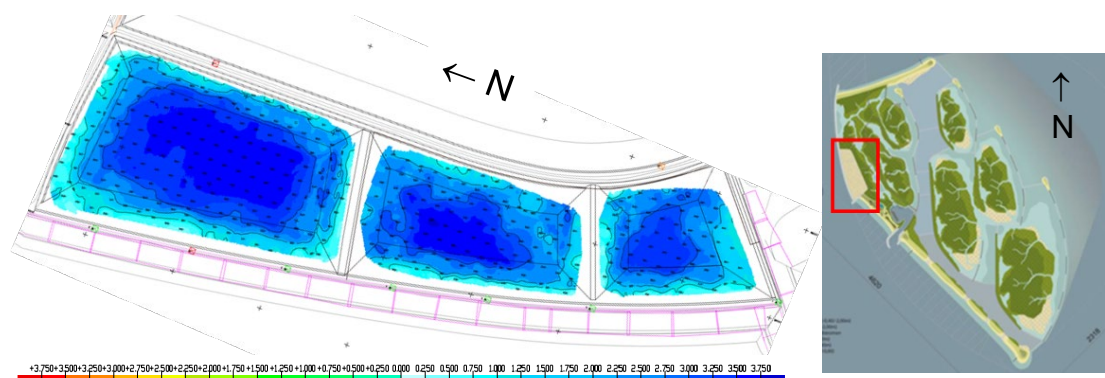
Deze deelvragen hebben een fysische-chemische en een biologische component die interactie met elkaar hebben. Het vegetatie-onderzoek is gerapporteerd door Princen en Kalle (2022) in een flankerend rapport. Het huidige rapport is het fysisch-chemische rapport. Beide rapporten verwijzen op diverse plekken naar elkaar vanwege de gecombineerde kennisvragen en optredende interacties tussen fysica en biologie.

Ten behoeve van het onderzoek naar bouwen met slib is in het ontwerp van Marker Wadden de aanleg voorzien van een drietal kleinere onderzoekscompartimenten naast de veel grotere reguliere compartimenten. De gedachte hierachter is dat onderzoek in de reguliere compartimenten lastig is door hun grootte en hun karakter van een bouwplaats, met beperkte toegankelijkheid, extra veiligheidseisen en prioriteit van aanleg boven onderzoek. In de onderzoekscompartimenten zou de prioriteit juist bij het onderzoek liggen.

In het volgende hoofdstuk (2) wordt de ligging en karakteristieken van deze onderzoekscompartimenten in meer detail besproken. Hierna volgt een hoofdstuk (3) over de opzet van het onderzoeks- en monitoringprogramma in deze compartimenten. Het vullen van de compartimenten met slib is het onderwerp van hoofdstuk 4. De resultaten van het onderzoek en monitoring worden beschreven in hoofdstuk 5, de kern van dit rapport. Tenslotte worden in hoofdstukken 6 en 7 respectievelijk de discussie van de resultaten en de conclusies beschreven.

2 Beschrijving van de onderzoekscompartimenten

De drie onderzoekscompartimenten zijn in totaal circa 10 ha groot. Figuur 2-1 toont de hoogteligging van de compartimenten na aanleg maar voorafgaand aan vulling met slib. Van het eerste en kleinste compartiment (2 ha) aan de zuidzijde ligt de bodem op een diepte van ca. -2.5 m NAP, van het middelste compartiment (3 ha) op ca. -3 m NAP en van het laatste en grootste compartiment (5 ha) aan de noordzijde op ca. -3.3 m NAP. Dit is aanmerkelijk ondieper dan de oorspronkelijke lokale bodemligging van het Markermeer (ca. -4.2 m NAP). Het verschil wordt veroorzaakt door dwarsverliezen tijdens de bouw van de dijk en kades van zand rondom de compartimenten en door golferosie van de oevers in de periode tussen aanleg en vullen met slib. Aanleg van de compartimenten is gestart in 2016 en vulling met slib vanaf juli 2019. De oorspronkelijke bodem bestaande uit een holocene kleilaag is dus afgedekt geraakt door een zandlaag met variabele dikte (dikker nabij de randen, dunner middenin, gemiddeld >1 m dik).



Figuur 2-1 Hoogteligging van de dunslibcompartimenten na aanleg maar voor vullen met slib (april 2019). Hoogte in m NAP. Het overzichtskaartje rechts geeft met een rode rechthoek aan waar de onderzoekscompartimenten liggen op Marker Wadden.

3 Monitoringplan

Tijdens dit project zijn vier veldmetingen (Tabel 3-1) verricht om eigenschappen van het slib in de testvakken te bepalen; fysische- en chemische eigenschappen, sterkte van het slib, zakking van de bodem en waterdruk in het slib. Een overzicht van de meetlocaties en gemeten eigenschappen is gegeven in Figuur 3-1 en Tabel 3-2.

Tabel 3-1: Data meet- en bemonsteringscampagnes dunslibcompartimenten

Meting	Meetperiode
1	Okt – Nov 2019
2	Jun 2020
3	Okt 2020
4	Okt 2021



Figuur 3-1 Overzicht meet- en bemonsteringslocaties Marker Wadden

Tabel 3-2: Overzicht van type metingen of bemonstering per locatie in de dunslibcompartimenten

Locatie	Beeker samples	Hand vane	Zakbaken	Rheotune	Waterspanningsmeters	Peilbuizen
Loc 1			X			
Loc 2	X*	X				X
Loc 3	X*	X*				X
Loc 4	X	X				X
Loc 5	X	X				X
Loc 6			X			
Loc 7			X			
Loc 8	X	X				X
Loc 9	X	X				X
Loc 10	X	X				X
Loc 11	X	X				X
Loc 12			X		X	
Stema 1				X		
Stema 2				X		
Stema 3				X		
Stema 4				X		
Stema 5				X		
Stema 6				X		
Stema 7				X		
Stema 8				X		
Stema 9				X		

3.1 Bemonstering fysische eigenschappen

Op acht vaste locaties ('Bekersamples' in Tabel 3-2 en Figuur 3-1) zijn fysische eigenschappen van slib bepaald. De Beekersamples zijn met een Beekersampler genomen. Monsters worden ongestoord genomen door de Beekersampler (buis) in het slib te drukken, de onderzijde van de buis af te sluiten en de buis met monster uit het slib te halen. De grondmonsters zijn gestoken op verschillende dieptes vanaf het bodemoppervlak tot 3,5 m minus het bodemoppervlak. De sediment samples zijn kwalitatief (visueel) en kwantitatief beoordeeld.



De volgende eigenschappen zijn in het laboratorium van Boskalis gemeten:

- Watergehalte [%] bepaald volgens NEN 15934

- Bulkdichtheid (ρ_{bulk} [kg/m³]) bepaald met een steekringmethode volgens Boskalis werkvoorschrift W004 conform NEN : 5110, BS 1377 : Part 1 : 2016 clause 9, Part 2 : 1990 clause 7.2 en ASTM : D7263-21 methode B.

Het watergehalte, de (natte) bulkdichtheid en de droge dichtheid zijn als volgt gerelateerd aan het droge en natte volume en de droge en natte massa van het monster:

$$\rho_{bulk} = \frac{M_{nat}}{V_{nat}}$$

$$\rho_{droog} = \frac{M_{droog}}{V_{nat}}$$

$$W = \frac{M_{droog} - M_{nat}}{M_{droog}}$$

M en V zijn respectievelijk Massa [kg] en Volume [m³].

- LOI¹ is bepaald door het monster nogmaals te verwarmen tot een temperatuur van 400 Celsius en opnieuw te wegen (proef 28 RAW 2020).

$$LOI = \frac{M_{droog\ 1}}{M_{droog\ 2}}$$

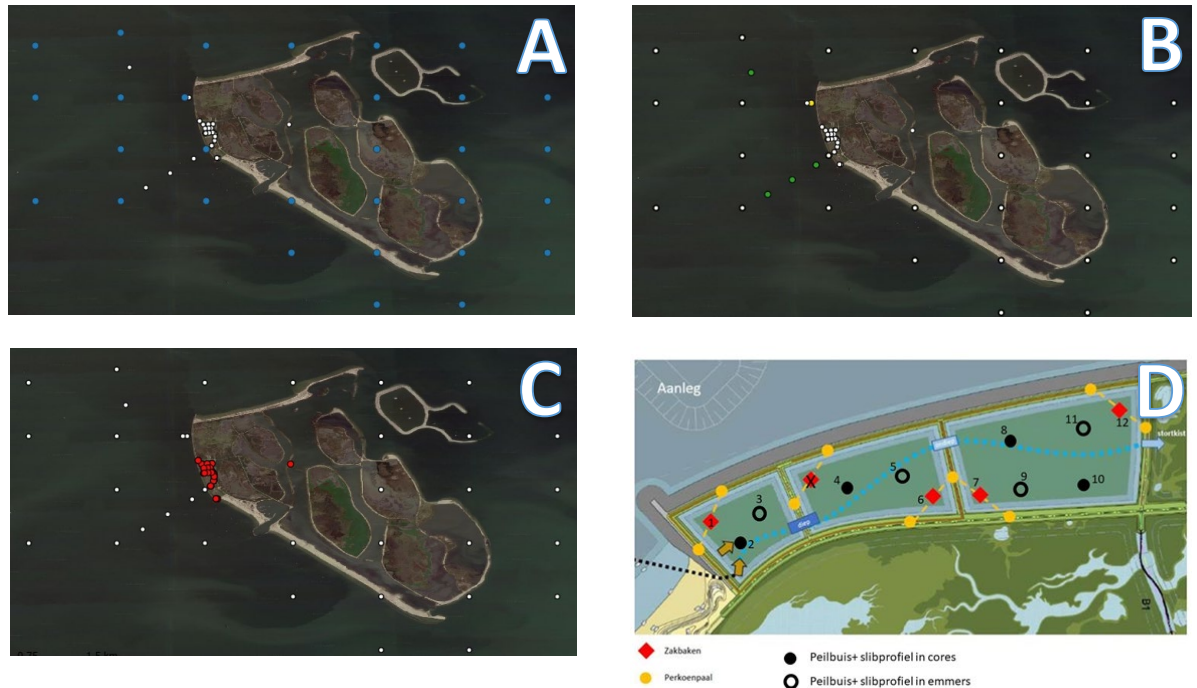
Waarbij droog 1 het eerste droogmoment is en droog 2 het tweede.

- De Atterbergse grenzen, vloeigrens en plasticiteitsgrens, zijn bepaald volgens proef 14 RAW 2020, gelijkwaardig aan ASTM D4318.
- De korrelgrootteverdeling is bepaald door middel van zeven op basis van de NEN-5753. Tijdens de eerste meetcampagne in 2019 zijn de volgende korrelgrote categorieën gedefinieerd in μm : 2000; 1000; 500; 250; 125; 106; 90; 75; 63; 53; 40 en materiaal kleiner dan 2 μm . Tijdens de overige drie campagnes is alleen het slibpercentage bepaald omdat de korrelgrootte verdeling niet verandert na de aanleg van de slibvakken.

3.2 Chemie poriewater

Voor het verzamelen van de poriewatermonster zijn er kolommen gestoken in de 3 verschillende slibcompartimenten. De bemonsterde locaties tijdens de drie verschillende monitoringsrondes waren overeenkomstig met de locaties van de peilbuizen in de drie compartimenten. Voor Compartiment 1 zijn dit locaties 2 en 3, voor Compartiment 2 zijn dit locaties 4 en 5 en voor Compartiment 3 zijn dit locaties 8, 9, 10 en 11. Deze poriewater monsters zijn op vier verschillende dieptes genomen, 2 cm, 5 cm, 10 cm en 20 cm in 2019, 2020 en 2021. Deze metingen zijn genomen met een rhizon in het laboratorium van Deltares in Utrecht.

¹ Ook wel uitgedrukt als het gewichtspercentage organische materiaal van het monster



Figuur 3-2 Locaties van de monsters voor vaste stof (A = bemonstering 2016 en B = bemonstering 2019) en poriewater (C en D)

Deze verkregen analyseresultaten zijn op 2 verschillende manieren bekeken: ontwikkeling per compartiment en diepte onafhankelijk van de uitwerking van verschillende ionen en metalen naar diepte. Compartiment 1 heeft twee monsterlocaties, compartiment 2 heeft twee monsterlocaties en compartiment 3 heeft vier monsterlocaties. Deze monsters zijn gemeten op macro ionen chloride, sulfaat, nitraat, etc. Daarnaast zijn ook op macro kationen Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc. gemeten met Ion Chromatografie (IC) en zijn de metalen bepaald met een Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES). Bicarbonaat (HCO_3^-) is niet gemeten maar berekend, door middel van het opstellen van een ionen balans in het monster. De positieve onbalans in de ionen balans wordt toegeschreven aan bicarbonaat, Het surplus aan kationen ten opzichte van anionen is de hoeveelheid bicarbonaat. Het wordt berekend volgens de formule:

$$\sum \text{anionen} \left(\frac{[\text{Cl}^-]}{35.5} + \frac{[\text{SO}_4^{2-}]}{96} * 2 + \frac{[\text{F}^-]}{31} + \frac{[\text{NO}_3^-]}{62} + \frac{[\text{NO}_2^-]}{61} + \frac{[\text{PO}_4^{3-}]}{95} * 3 \right) = \sum \text{kationen} \left(\frac{[\text{K}^+]}{39} + \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{40} * 2 + \frac{[\text{Na}^+]}{23} + \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{24} * 2 + \frac{[\text{NH}_4^+]}{18} + \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{56} * 2 + \frac{[\text{Mn}^{2+}]}{55} * 2 \right) \quad (1)$$

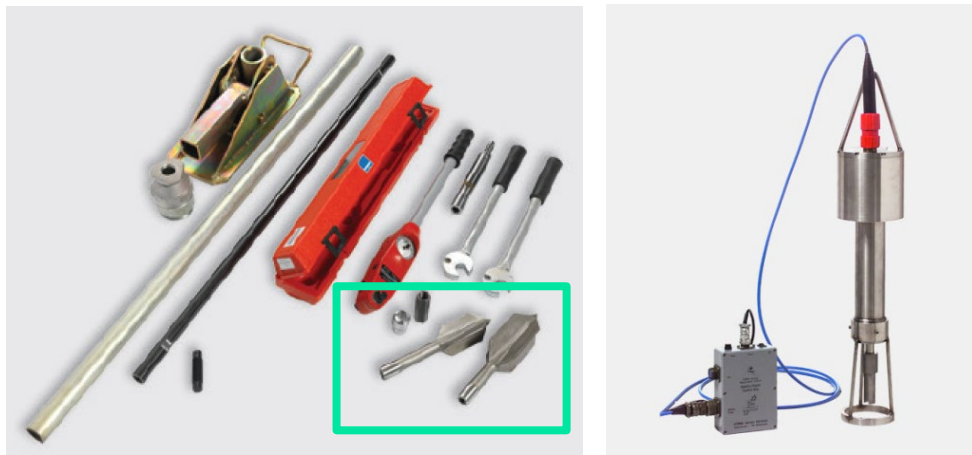
$$[\text{HCO}_3^-] = 61 * (\sum \text{Covalente Kationen} - \sum \text{Covalente anionen}) \quad (2)$$

3.3 Chemische samenstelling: vaste stof

De vaste stof metingen zijn uitgevoerd voor 3 tot 4 verschillende diepteranges: 0 tot 2,5 cm; 2,5 tot 5 cm; 5 tot 7,5 (of het einde van de steekkern); 7,5 cm tot het einde steekkern. Deze ranges hangen af van de hoogte van de kolom. Het bemonsterde materiaal is gebruikt bij de aanleg van Marker wadden, omdat er geen data beschikbaar is van de vaste stof in de dunslibcompartimenten is dit gebruikt om een inschatting te geven van het ingangsmateriaal in het depot. Van de bemonsterde vaste stof monsters is de macrosamenstelling (zoals Al_2O_3 , SiO_2 en CaO) gemeten met een XRF(X-Ray Fluorescence). Verder is het percentage organische stof en carbonaat bepaald met een TGA. De monitoringsrondes zijn uitgevoerd in 2016, 2019 en 2020, zie Figuur 3-2 voor de monsternamelocaties

3.4 Sterkte-metingen

De sterkte van de grond is in-situ gemeten met een hand vane en met een Rheotune (Figuur 3-3). De Rheotune meting is alleen gebruikt bij Veldmeting 1 en 2.



Figuur 3-3 Afbeelding van een hand-vane (links) en van de Rheotune (rechts)

3.4.1 Hand vane

Per locatie wordt de vane op verschillende dieptes (intervallen van 0,5 m) in de grond gestoken tot een diepte van maximaal -3.5 m onder het bodemoppervlak. Op iedere diepte wordt doormiddel van een draaiende beweging een kracht uitgeoefend op de ondergrond. De reactiekracht van de ondergrond wordt gemeten als een moment dat wordt omgerekend naar een schuifspanning (maat voor de sterkte van de ondergrond) d.m.v. formule.

$$c_u = T * \frac{10}{K} * \frac{1}{2}$$

c_u is de ongedraineerde sterkte in Pa, T is de afgelezen schaalwaarde ($\times 0.2$ Nm) en K is een kalibratie constante in m^3 die verschilt per type vane. Er zijn drie verschillende vane's met verschillende afmetingen gebruikt omdat de sterkte van het slib varieerde per locatie en iedere vane zijn eigen meetrange heeft.

3.4.2 Rheotune metingen

Metingen met de Rheotune zijn uitgevoerd door het bedrijf Stema. De Rheotune is een akoestisch apparaat. De uitgezonden geluidsgolven worden door de slibdeeltjes gereflecteerd en deze reflectie wordt door de Rheotune het gemeten. Het apparaat wordt in de grond gedrukt en meet de in situ de sterkte en dichtheid van de grond continue tot een diepte van maximaal -2.5 m onder het bodemoppervlak (US Army Corps of Engineers, 2015). De Rheotune metingen zijn alleen in vak 3 verricht.

3.5 Zetting ondergrond. zakkakens (4 stuks) en zakking maaiveld (12 locaties)

De zetting van de ondergrond is gemeten op 4 locaties m.b.v. zakkakens. Bovendien is op 12 locaties de zakking van het maaiveld gemeten, namelijk io de 4 locaties met zakkakens en op de 8 bemonsteringslocaties.

3.5.1 Zakbakens

De zakbakens zijn palen met een lengte van 4,5 m en is 2,5 m in de grond gestoken. Hier bevindt zich een harde onderlaag en geeft de zakbaak stabiliteit. Door het gewicht van het aangebrachte slib kan ook de ondergrond zakken (zetting). Beide zakkings worden gemonitord door zowel de bovenkant van de baak als ook de hoogte van het aangebrachte slib te meten t.o.v. NAP. Het verschil tussen de zakkings van de bovenzijde van de sliblaag en de zakkings van de ondergrond is de inklinking van de aangebrachte sliblaag t.g.v. het consolidatie- en rijpingsproces. Omdat de aangebrachte sliblaag dikker is dan 2 m is op de zakbakens een verlengstuk van 2 m geplaatst. De totale afstand tussen de boven- en onderkant van de bakens (d.w.z. het niveau van de ondergrond) is dus 4 m.

Meetlocaties

Voor de ligging van de 8 (bemonstering) + 4 (zakbakens) = 12 meetlocaties zie Figuur 3-1.

3.6 Waterdruk

De waterdruk van het materiaal geeft informatie over de consolidatie van het slib. Door consolidatie wordt water uit het slib geperst en neemt de waterdruk in het slib geleidelijk af. De waterdruk is gemeten door middel van drukmeters in peilbuizen op 8 verschillende locaties en een waterspanningsmeter op locatie 12.

3.6.1 Peilbuizen:

De peilbuizen meten de stijghoogte (of waterdruk) van het grondwater. De peilbuizen (zie Figuur 3-4) zijn hol. In de buis hangt een drukmeter aan een staaldraad met een lengte van 3.85 m. Deze draad is bevestigd aan de bovenzijde van de buis. Naast de drukmeters die de waterdruk meten is ook met één drukmeter de luchtdruk gemeten als referentie. In totaal zijn acht drukmeters geïnstalleerd. Uiteindelijk zijn door ongeplande grondwerkzaamheden en weersinvloeden enkele peilbuizen en drukmeters verloren gegaan. Tabel 3-3 toont de meetperiodes per locatie.

Tabel 3-3 Overzicht locaties met peilbuizen en begin en eind van de meetperiode

Locatie	2	2 - Baro	3	4	5	8	9	10
Start	Okt 2019	Okt 2019	Okt 2019	Nov 2019	Nov 2019	Nov 2019	Nov 2019	Nov 2019
Eind	Okt 2021	Okt 2021	Okt 2021	Nov 2020	Okt 2020	Jul 2020	Jul 2020	Jul 2020

De lokale korrelspanning [Bar] is berekent door:

$$korrelspanning_{lokaal} = Druk_{lokaal} - Druk_{lucht} - (\rho_{water} * g * h)$$



Figuur 3-4 Foto van peilbuis in de dunslibcompartimenten

3.6.2 Waterspanningsmeter

Op Locatie 12 zijn drie waterspanningsmeters aan de zakbaak bevestigd op verschillende hoogtes (Figuur 3-5).



Figuur 3-5 Foto van een waterspanningsmeter gemonteerd aan de zakbaken op locatie 12 in de dunslibcompartimenten

4 Vullen van compartimenten, peilbeheer en overige activiteiten

Volgens het oorspronkelijke plan zouden de compartimenten worden gevuld met dun slib afkomstig uit de slibgeul. De sedimentatiesnelheid in de slibgeul bleek echter minder hoog dan waarmee tijdens het ontwerp rekening was gehouden (zie voor meer details hierover Hanssen et al, 2022) en winning van slib hieruit te duur. Vanwege voortschrijdende oevererosie is besloten door het Bouwteam om de dunslibcompartimenten te vullen met holocene klei, d.w.z. met hetzelfde type sediment als waarmee de reguliere compartimenten zijn gevuld. Dit betekent dat het onderzoek in de dunslibcompartimenten later is begonnen en met een ander type slib.

Figuur 4-1 toont de toestand in de dunslibcompartimenten voor en na de eerste vulslag. Deze heeft plaatsgevonden tussen 17 juli en 20 augustus 2019. Vulling is gestart in het eerste compartiment op de positie gemarkeerd met '1', maar is op 5 augustus verplaatst naar positie '2' in het tweede compartiment omdat het slib onvoldoende vanzelf doorstroomde, hoewel de er van tevoren openingen waren gemaakt in de zanddammen tussen de compartimenten. In totaal is ca. 440.000 m³ slib in de compartimenten gepompt met een bulkdichtheid van ca. 1180 kg/m³. Deze dichtheid is veel lager dan van de oorspronkelijke holocene kleibodem doordat er bij het baggeren en verpompen water is bijgemengd. Aan het uiteinde van het derde compartiment was een overloop (stortkist) geplaatst om het overtollige proceswater af te voeren. In de laatste fase van het vullen is niet alleen proceswater, maar ook slib via de overloop uitgestroomd, omdat de bezinktijd van het slib te laag was t.o.v. de verblijftijd van het slib tussen vulpunt 2 en de overloop. Hierdoor is circa 75.000 m³ slib weer uitgestroomd. Dit is later aangevuld met een tweede vulslag in februari 2020 in het derde compartiment vanaf positie 3. In totaal is er gemiddeld dus sliblaagdikte van 440.000 m³ over 100.000 m² aangebracht, d.w.z. 4.4 m. Dit komt overeen met ca. 1.2 TDS (ton droge stof) per m². Overigens is de laagdikte variabel t.g.v. de variabele bodemligging en de niet-uniforme uitstroming en verspreiding.

Figuur 4-2 toont de bodemligging van de compartimenten aanvang 2021, d.w.z. 11 maanden na de tweede vulslag. De resterende laagdikte bedraagt op dat moment nog ca. 2.7 m, d.w.z. 1.7 m zinking t.g.v. sedimentatie en consolidatie, inclusief een kleine bijdrage van zetting van de ondergrond. Het tweede en derde compartiment liggen daardoor grotendeels permanent onder water, terwijl het eerste compartiment grotendeels permanent boven water ligt. Door de lage ligging van compartimenten 2 en 3 in combinatie met beperkingen in het peilbeheer was minder onderzoek mogelijk naar de invloed van vegetatie en korstvorming op de consolidatie van de sliblaag. De beperkingen in het peilbeheer werden veroorzaakt door een combinatie van een tekort aan drainage tussen de compartimenten en bij de afvoer, beschikbare pompcapaciteit, verwijdering van een stuw en de noodzaak voor een hoog peil in het voorjaar om wilgengroei tegen te gaan. Zie Princen en Kalle (2022) voor verdere details. Het peilverloop in compartiment 2 is weergegeven in Figuur 4-3.

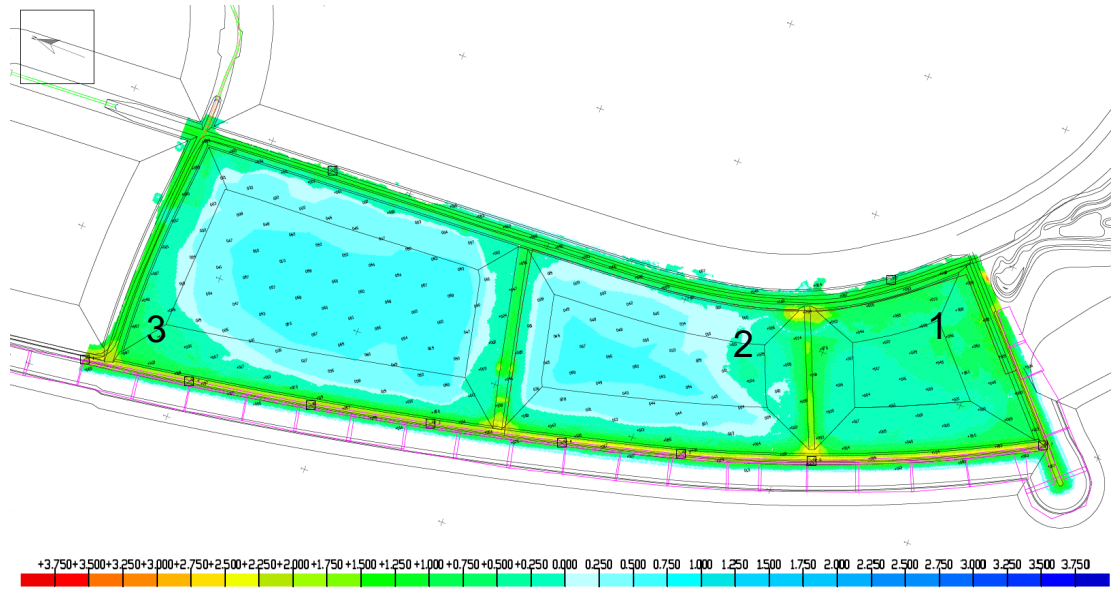
In 2020 hebben bovendien graafwerkzaamheden plaatsgevonden aan de kades rondom de compartimenten. Hierdoor is de sliblaag met de daarin geplaatste zakbakens en peilbuizen plaatselijk verstoord geraakt, wat de interpretatie van de metingen bemoeilijkt. In het derde compartiment heeft ook de tweede vulslag tot verstoring geleid. Bij plaatsing na de eerste vulslag was nog niet bekend dat later een tweede vulslag zou worden uitgevoerd. Samenvattend hebben de volgende afwijkingen plaatsgevonden ten opzichte van de oorspronkelijke opzet:

- Vulling op een later tijdstip waardoor een kortere meetperiode mogelijk was
- Vulling met holocene klei i.p.v. dun slib uit de slibgeul
- Vulling in twee slagen i.p.v. één slag
- Lagere dan voorziene vulhoogte in compartimenten 2 en 3
- Diverse beperkingen in het peilbeheer
- Diverse verstoringen van de sliblaag en instrumentatie t.g.v. grondwerkzaamheden

In de onderzoekscompartimenten is het dus maar beperkt mogelijk gebleken om te sturen op omstandigheden, maar is wel gedetailleerde monitoring mogelijk geweest naar het consolidatiegedrag van de sliblaag en instrumentatie t.g.v. grondwerkzaamheden.



Figuur 4-1 Foto's van de dunslibcompartimenten vlak voor (boven) en vlak na (onder) de eerste vulslag (resp. 15 juli en 29 augustus 2019). Vulpunten aangeduid met cijfers 1, 2 en 3.



Figuur 4-2 Hoogteligging van de dunslibcompartimenten 11 maanden na de tweede vulslag (5 januari 2021). Hoogte in m NAP. Vulpunten 1, 2 en 3 zijn hierin ook aangegeven. Markermeer winterpeil NAP -0.2 - -0.4 m; zomerpeil NAP -0.3 - -0.1 m.



Figuur 4-3 Verloop waterpeil in compartiment 2 (Princen en Kalle, 2022).

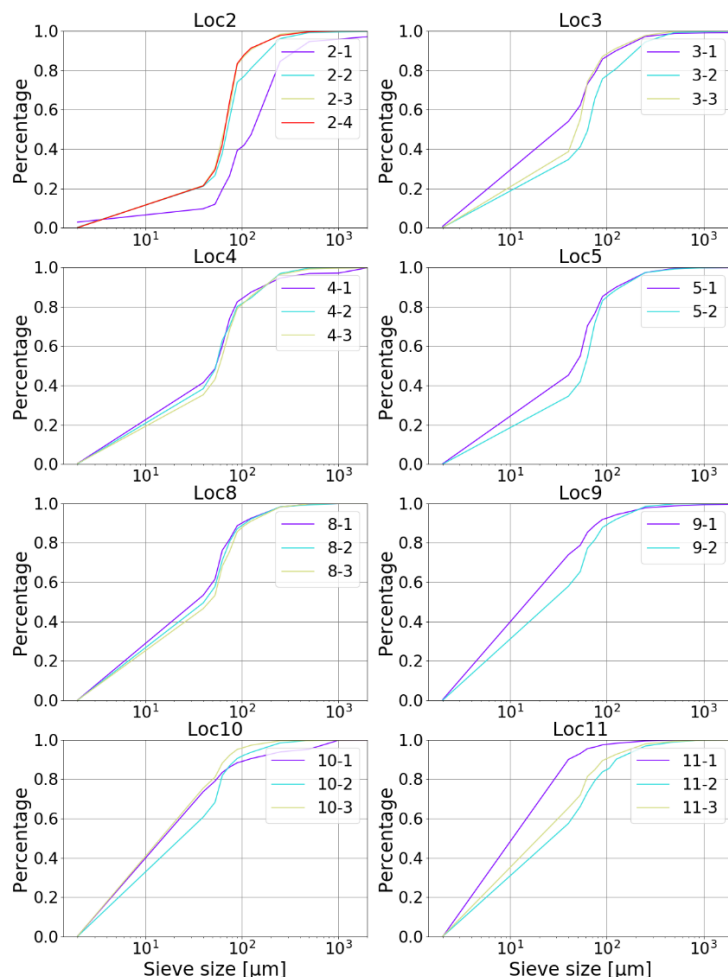
5 Resultaten monitoring

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de meet- en monitoringcampagne besproken. Achtereenvolgens worden de fysische en chemische parameters op basis van de bemonsterde profielen gepresenteerd, gevolgd door de in-situ sterkte- en dichtheidsmetingen metingen, de hoogtedata en zakking van de sliblaag en ondergrond en de waterspanningen.

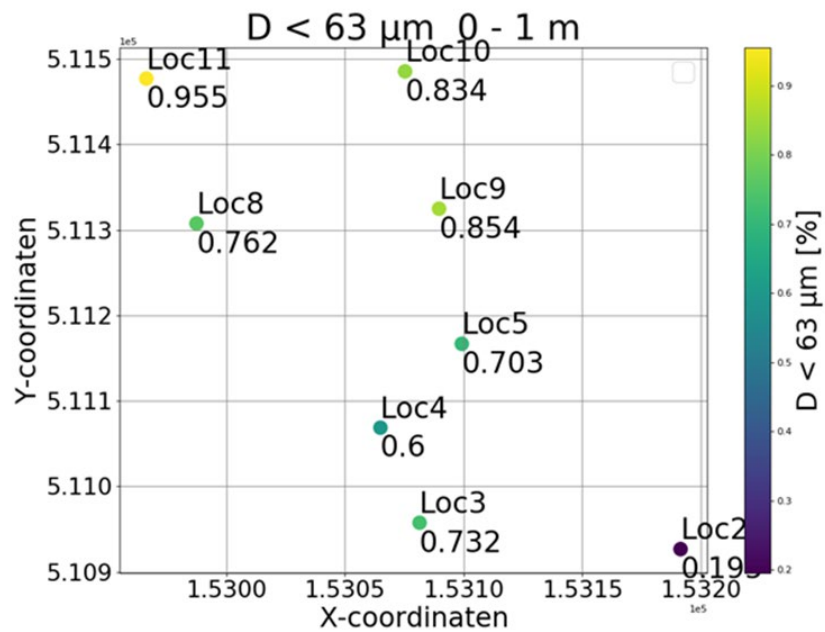
5.1 Bemonstering fysica

5.1.1 Gradiënten korrelgrootte

Na het vullen van de slibvakken (zie Hoofdstuk 4) is de korrelgrootte verdeling op verschillende dieptes bepaald voor acht locaties (Figuur 5-1). In vak 1, locatie 2 en 3, is het percentage fijn materiaal (< 63 µm) kleiner dan voor de andere 2 slibvakken (Figuur 5-2). Voor locatie 2 is het materiaal in de toplaag kleiner dan in de diepere lagen in tegenstelling tot de andere locaties. Slibvak 3 (locaties 8-11) bevat de hoogste percentages fijn materiaal. Dit vak was het verst verwijderd van de vullocatie en er is tijdens de uitstroming dus een sterke segregatie opgetreden. Voor locaties 4, 5 en 8 is de korrelgrootte verdeling ongeveer gelijk op de gemeten dieptes.



Figuur 5-1 Korrelgrootteverdeling op de 8 bemonsteringslocaties na de eerste vulslag. Subnummers 1 t/m 4 verwijzen naar de diepte onder het sliboppervlak, namelijk de in de 1^e, 2^e, 3^e en 4^e meter onder het oppervlak.



Figuur 5-2 Ruimtelijke verdeling van het % < 63 μm (i.e. slibpercentage) in de bovenste meter van de sliblaag.

5.1.2 Ontwikkeling profielen dichtheid, droge stof, watergehalte en LOI

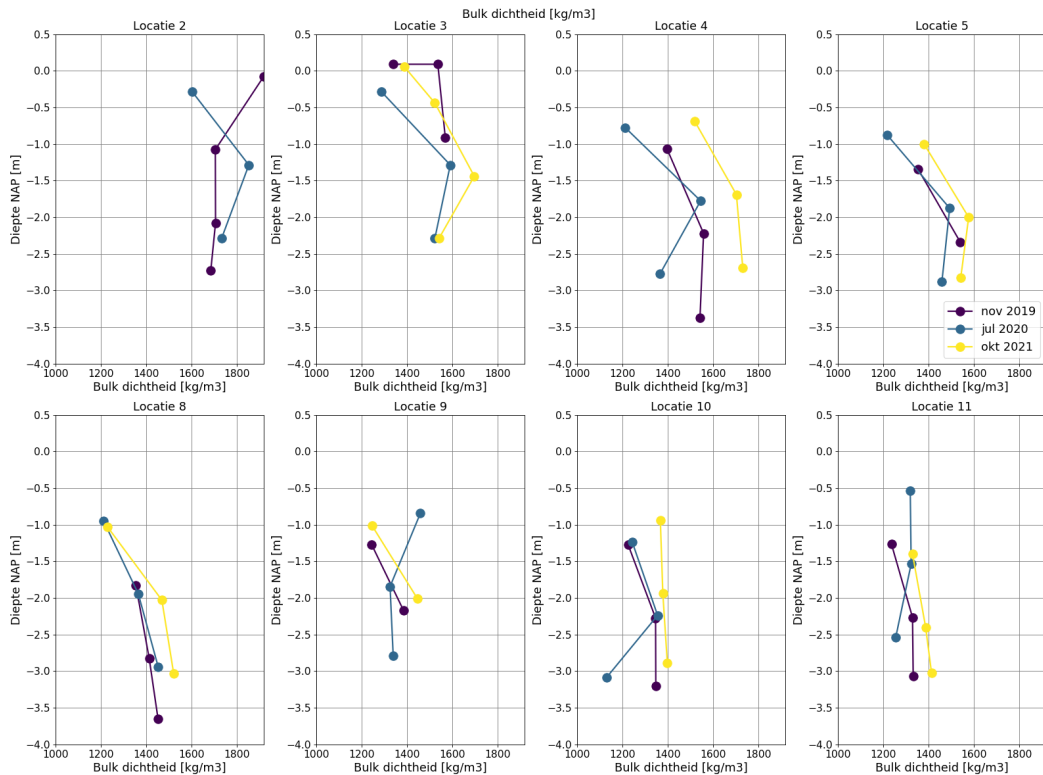
De bulkdichtheid, het watergehalte, percentage droge stof en LOI zijn drie keer gemeten tussen nov 2019 en okt 2021. Figuur 5-3 – Figuur 5-6 tonen de verandering van de parameters over tijd (verschillende kleuren) en over de diepte per locatie. De dichtheid en het percentage droge stof (gecorrleerde parameters) van het slib nemen toe in de tijd en over de diepte. Beide parameters zijn het grootst in vak 1. De maximale toename van de dichtheid is 16% en voor droge stof 21% gedurende twee jaar (Locatie 4). De einddichtheid is het hoogste in het compartiment 1 door het hoge zandgehalte. Het drogestofgehalte bedraagt hier meer dan 60%. In compartiment 3 is de einddichtheid het laagste doordat hierin het fijnste slib is terechtgekomen. Het drogestofgehalte na 2 jaar varieert hierin tussen 40% en 50%.

Het watergehalte heeft een tegenovergesteld gedrag van het percentage droge stof en de dichtheid. Dit is logisch omdat het watergehalte w omgekeerd evenredig is met het percentage droge stof c volgens:

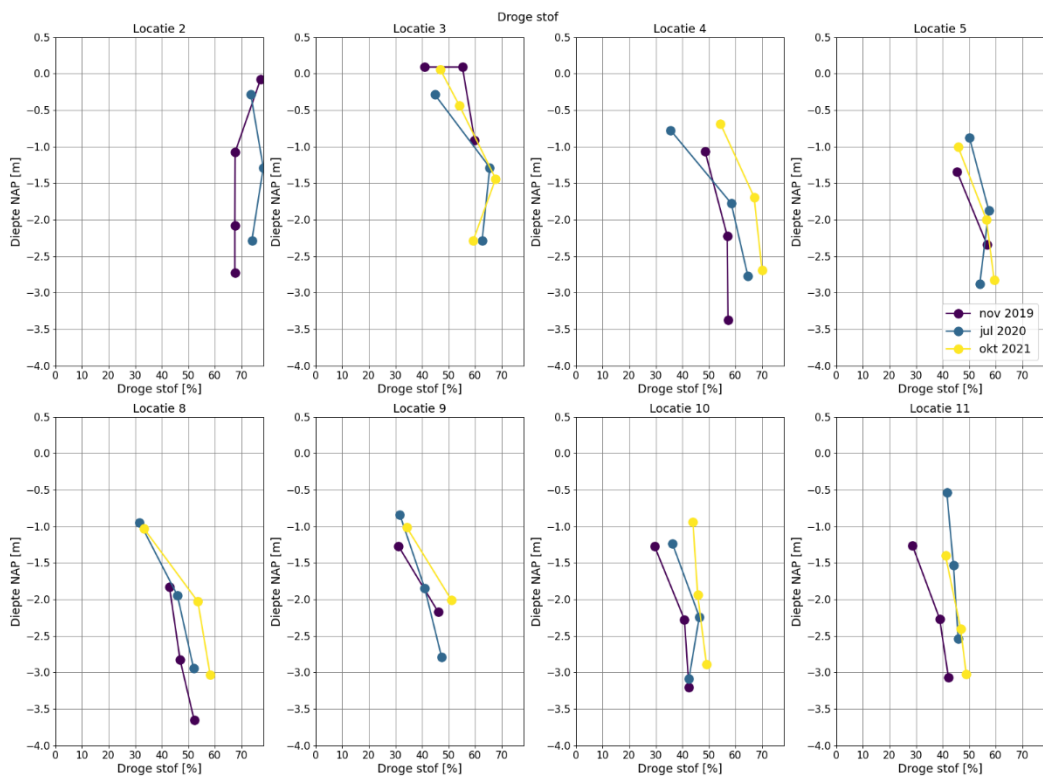
$$w = (100 - c) / c \times 100\%$$

Het watergehalte is het hoogst in vak 3 (locaties 8 - 11). In alle vakken neemt het watergehalte af over tijd en in de diepte. De grootste afname is in de toplaag van locatie 10 (50%).

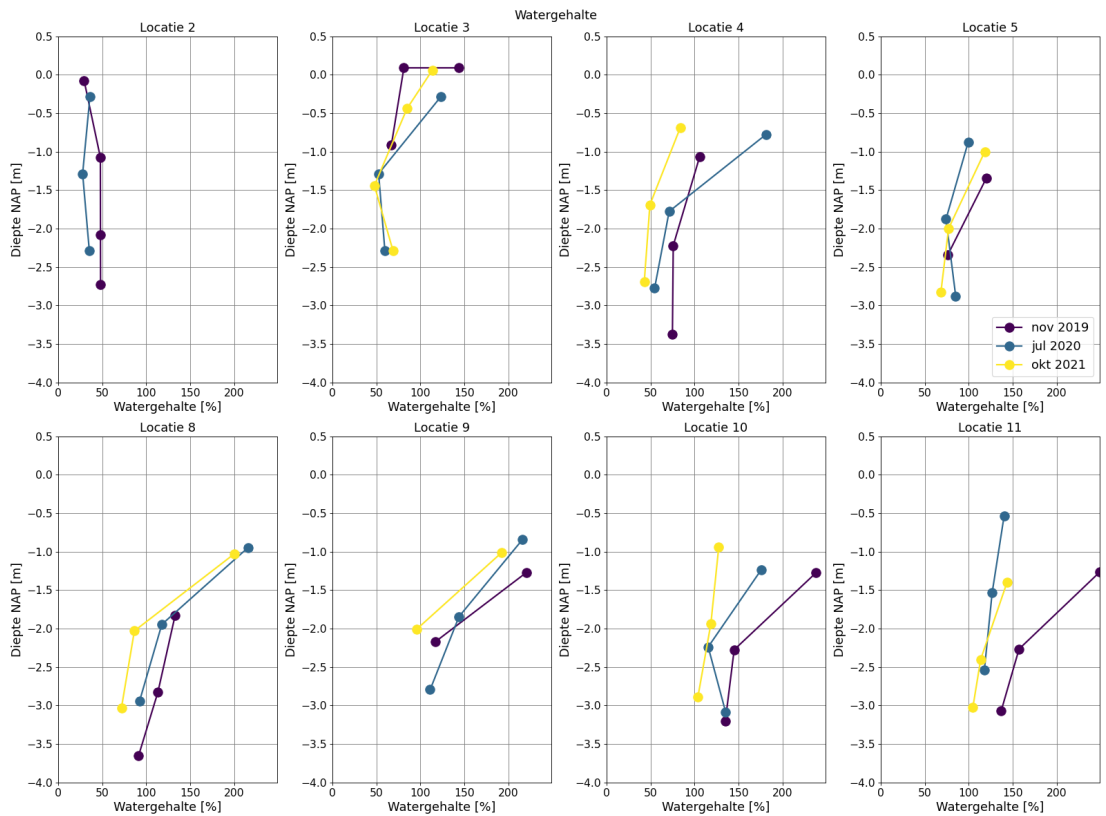
Het percentage LOI ('loss on ignition', een maat voor het organisch gehalte) in het hoogste in de toplaag, met uitzondering van locatie 2. De toplaag is de meest zuurstofrijke laag en de laag met het hoogste percentage fijn materiaal (met uitzondering van locatie 2). Het percentage organische materiaal neemt licht af voor de meeste locaties, hetgeen verklaard kan worden door geleidelijke afbraak.



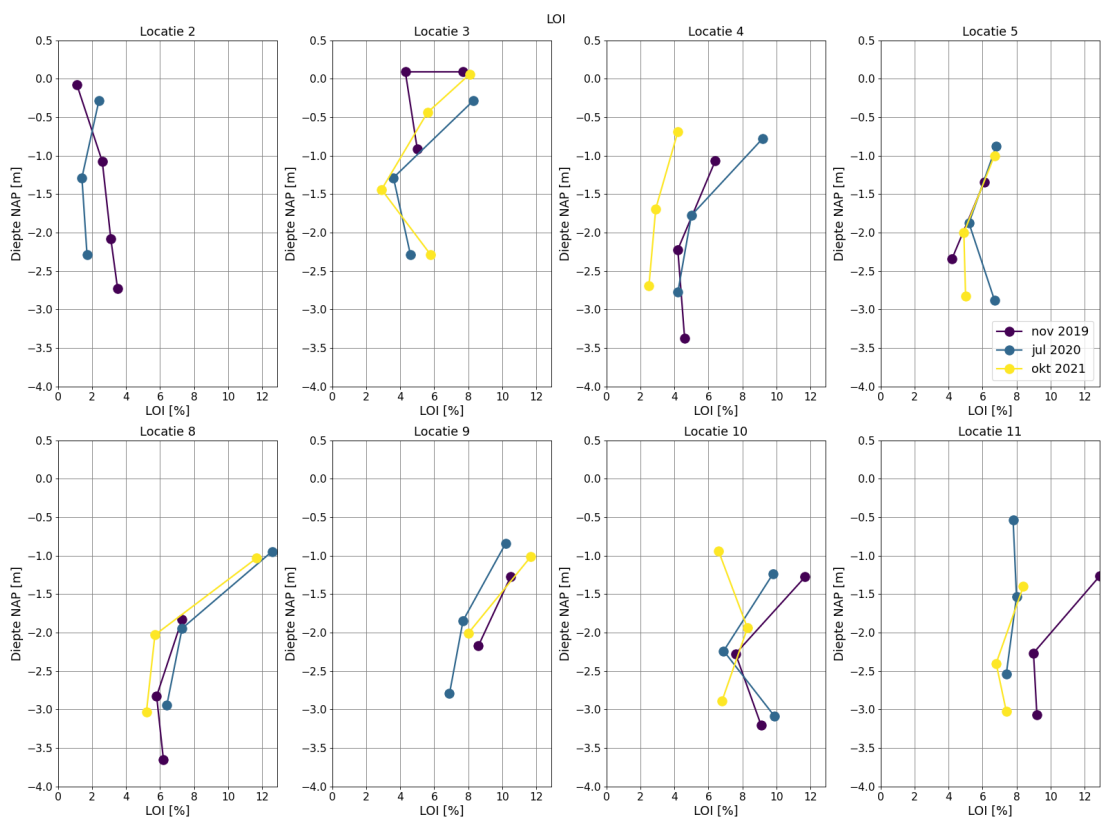
Figuur 5-3 Ontwikkeling bulkdichtheid op de 8 bemonsteringslocaties tussen november 2019 en oktober 2021.



Figuur 5-4 Ontwikkeling drogestofgehalte op de 8 bemonsteringslocaties tussen november 2019 en oktober 2021.



Figuur 5-5 Ontwikkeling watergehalte op de 8 bemonsteringslocaties tussen november 2019 en oktober 2021.

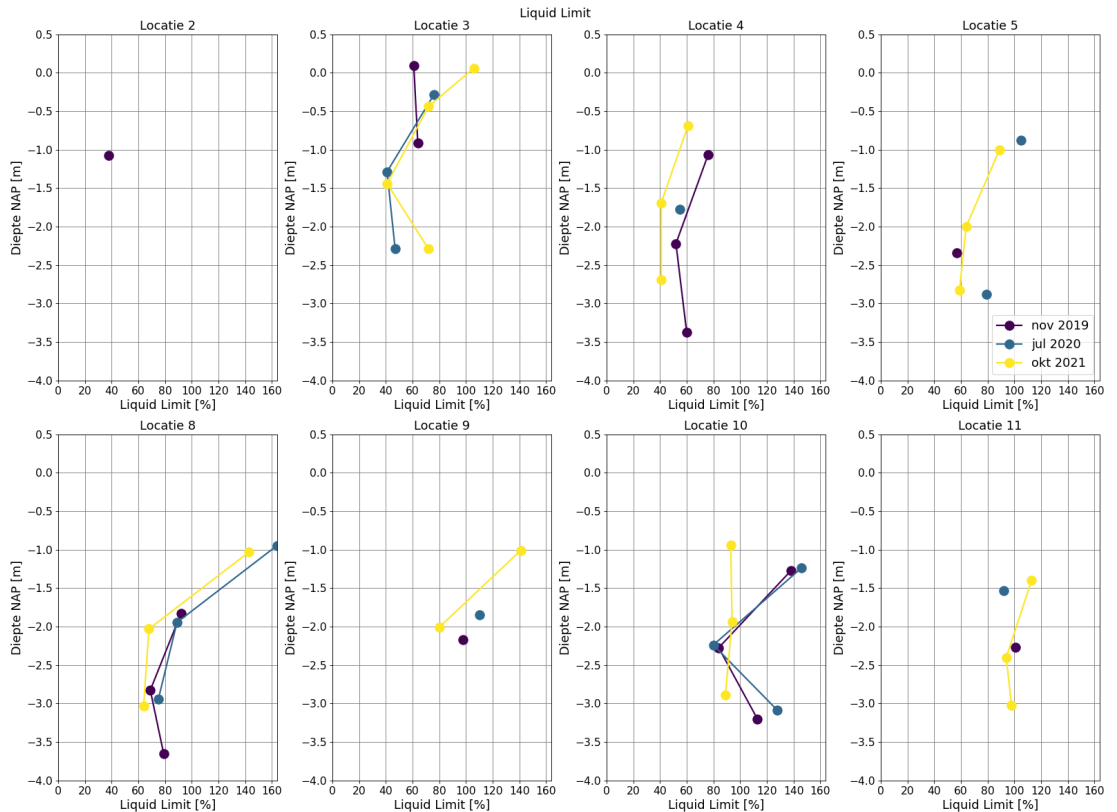


Figuur 5-6 Ontwikkeling organisch gehalte (LOI = 'loss on ignition') op de 8 bemonsteringslocaties tussen november 2019 en oktober 2021.

5.1.3 Atterbergse grenzen

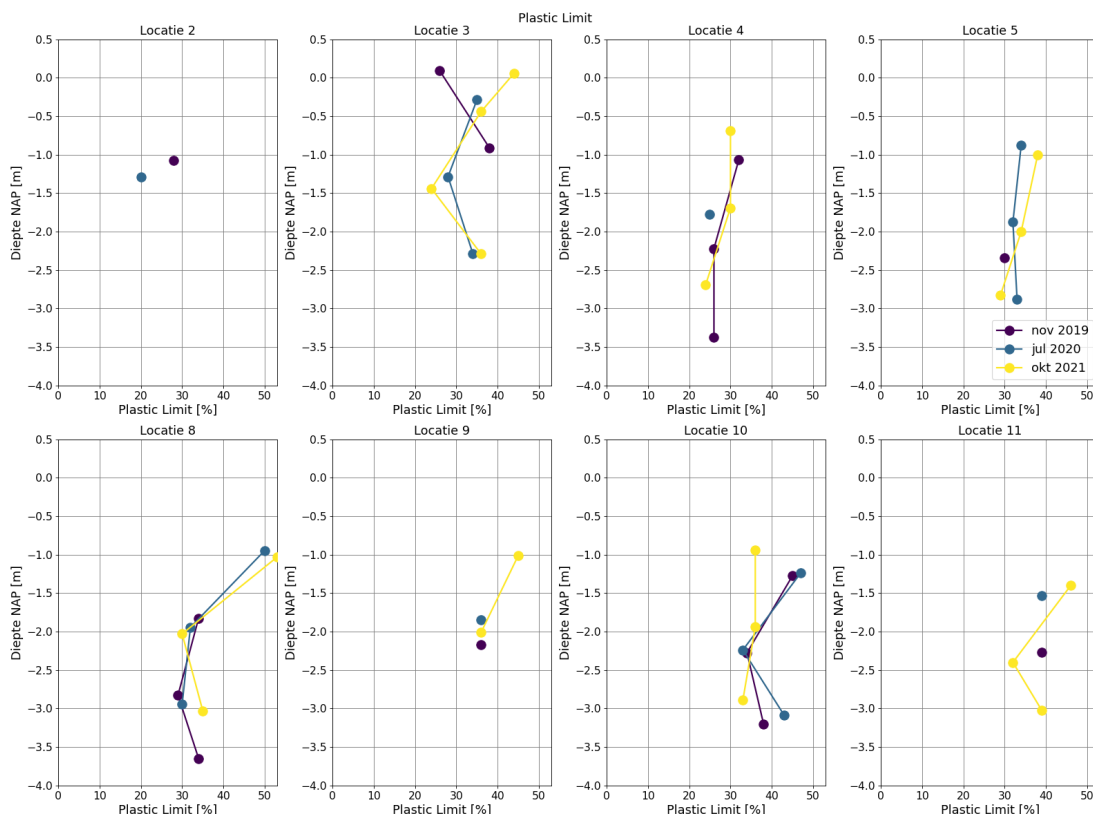
De vloeigrens is standaard lager dan de plasticiteitsgrens. Materiaal met een hoger slibgehalte heeft doorgaans een hogere vloe- en uitrolgrens en een hogere plasticiteitsindex (d.w.z. het verschil tussen vloe- en uitrolgrens). Dit blijkt ook uit Figuur 5-7 en Figuur 5-8. De vloeigrens voor vak 1 ligt veel lager en is het hoogst in vak 3. Net als het watergehalte neemt de vloeigrens af in tijd en diepte.

De plasticiteitsgrens is voor de meeste locaties in dezelfde orde grootte. In vakken 1 en 2 is de plasticiteitsgrens ongeveer 30% en in vak 3 40%. De plasticiteitsgrens neemt af in diepte en in tijd maar de verschillen zijn verwaarloosbaar in vergelijking met de vloeigrens.



Figuur 5-7 Ontwikkeling van de vloeigrens ('Liquid Limit') op de 8 bemonsteringslocaties tussen november 2019 en oktober 2021.

Locatie 2 nauwelijks data beschikbaar vanwege het grote zandgehalte. Hier is het sediment niet tot nauwelijks cohesief, waardoor geen plasticiteitsgrenzen kunnen worden bepaald.



Figuur 5-8 Ontwikkeling van de uitrolgrens ('Plastic Limit') op de 8 bemonsteringslocaties tussen november 2019 en oktober 2021.

5.2 Bemonstering chemie

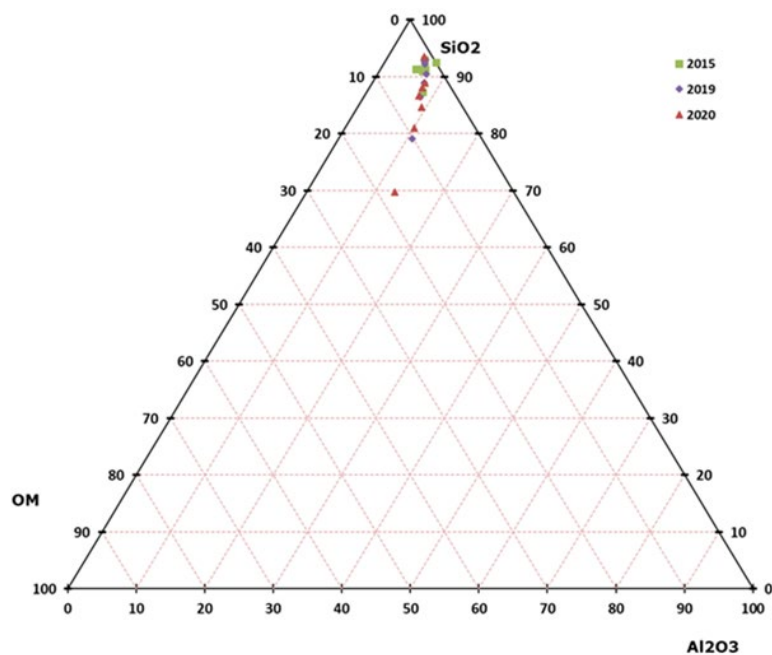
5.2.1 Vaste stof

5.2.1.1 Driehoeksdigrammen

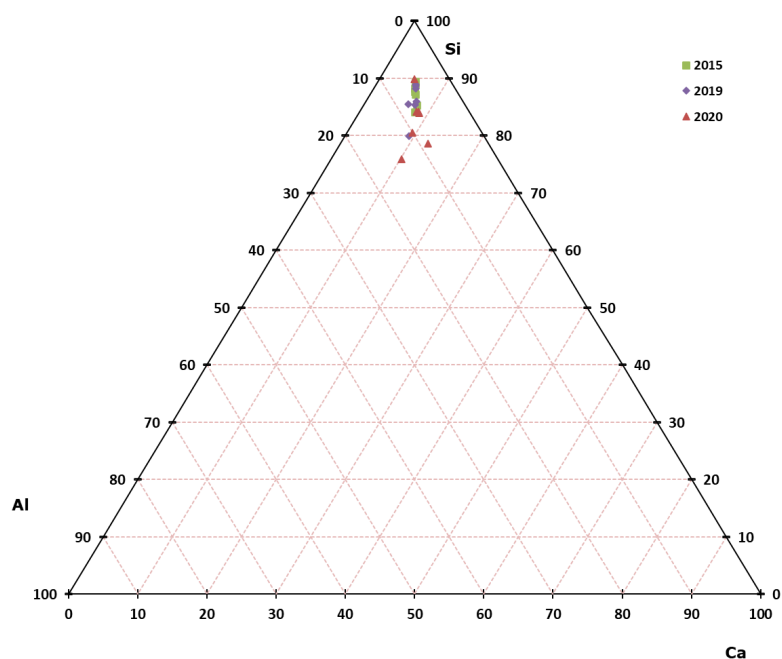
De vaste stof monsters komen voort uit drie monitoringscampagnes in 2015, 2019 en 2020, de exacte locaties waar de monsters genomen zijn, zijn weergegeven in Figuur 3-1. De chemische analyses zijn niet op alle monsters uitgevoerd, maar slechts op een selectie (locaties 2 t/m 5 en 8 t/m 11). De data is geplott in een 'driehoeksdigram'. De driehoeksdigrammen zijn genormaliseerd, d.w.z. dat alle concentraties samen 100% moeten zijn. Dit diagram geeft daardoor de onderlinge verhoudingen weer tussen de drie getoonde stoffen. In Figuur 5-9 zijn dit SiO_2 , Al_2O_3 en %OM, in Figuur 5-10 zijn dit SiO_2 , Al_2O_3 en CaO en in Figuur 5-11 zijn dit Al_2O_3 , CaO en Fe_2O_3 .

Over de horizontale lijntjes wordt de verhouding tussen SiO_2 en Al_2O_3 – CaO weergegeven (Figuur 5-10). In dit geval bestaan de meeste monsters voor 80-90% SiO_2 . De verhouding tussen aluminium en calcium wordt niet direct op de X-as afgelezen, maar tussen de y-as lijnen. In dit geval tussen de 10-90 en de 20-80 lijn. Dit geeft weer dat de calcium-aluminium verhouding ~50-50 is. Deze verhouding varieert vrijwel niet tussen de verschillende monsters, gedurende de drie bemonsteringsrondes.

Uit Figuur 5-9 blijkt dat in 2015 het percentage SiO_2 hoog was ten opzichte van Al_2O_3 en %OM, in dit geval 80-90%. De verhouding OM en Al_2O_3 ligt tussen de 10-90 lijn. Dit duidt erop dat de verhouding OM Al_2O_3 ongeveer 50-50 is. In 2019 en 2020 blijft deze verhouding gelijk het percentage SiO_2 neemt wel af want de verhouding OM: Al_2O_3 ligt hier tussen de 20-80 lijn.

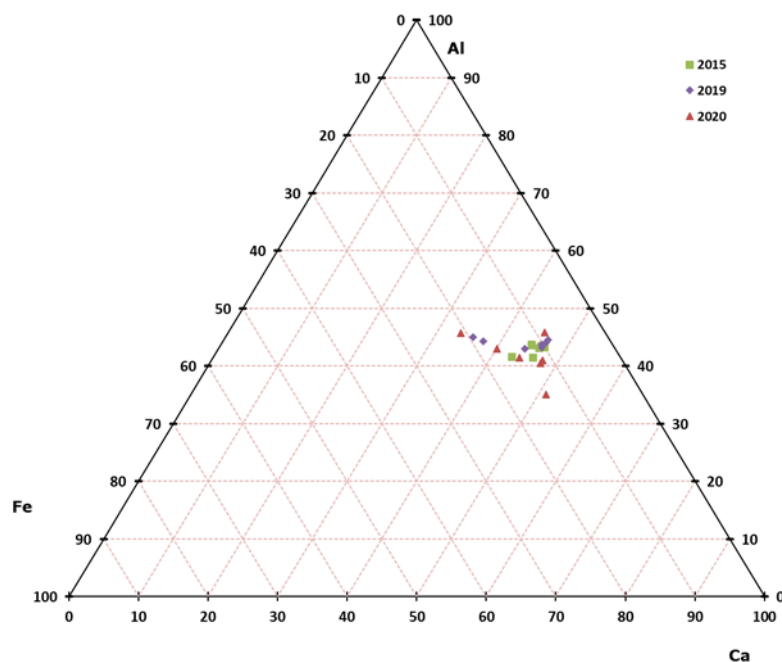


Figuur 5-9 Driehoeksdiagram SiO_2 , %OM en Al_2O_3



Figuur 5-10 Driehoeksdiagram van SiO_2 , CaO en Al_2O_3

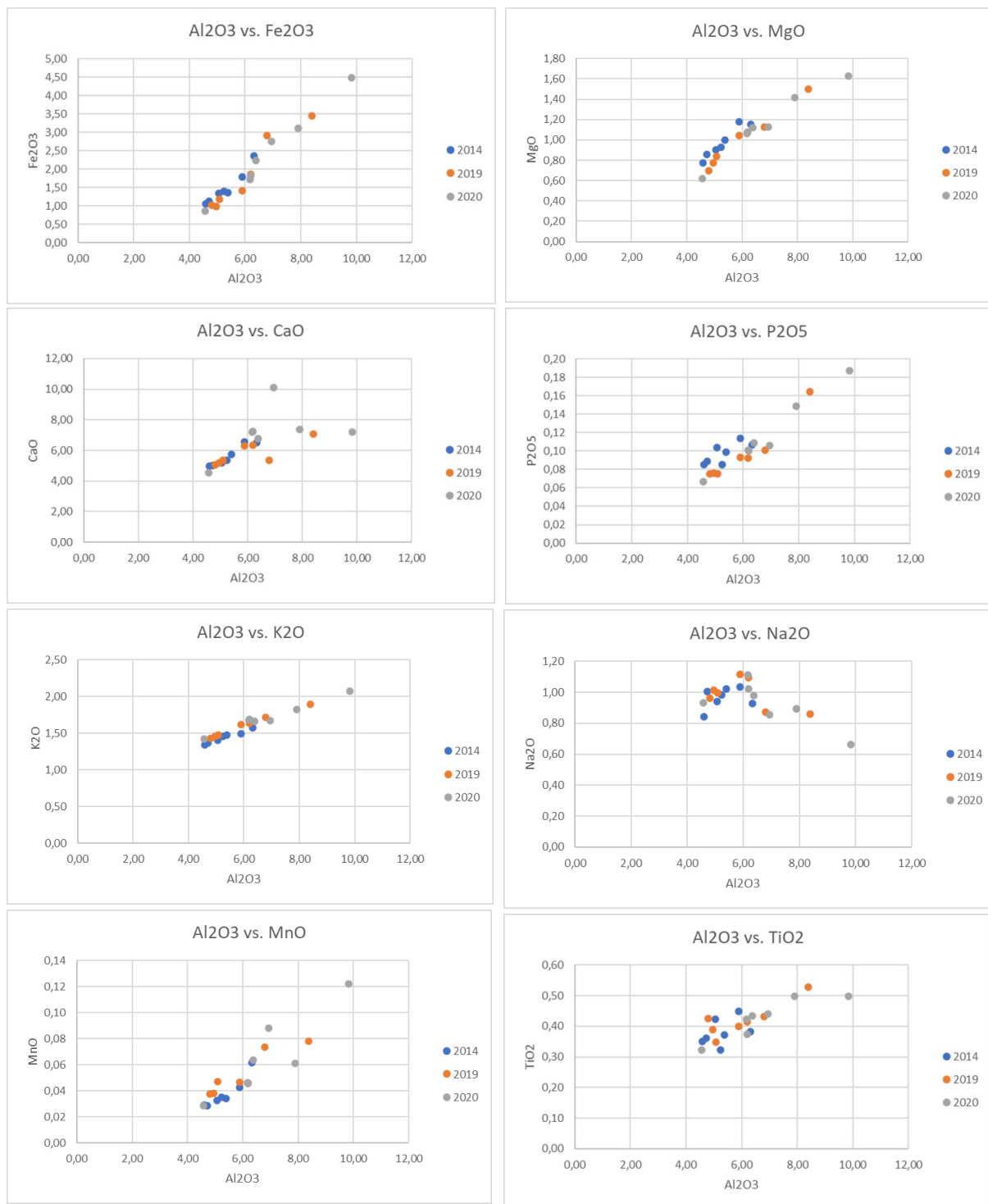
Uit Figuur 5-11 is af te lezen waaruit de bijmenging in het zand vooral bestaat en of deze homogeen is. In 2015 bestaat het grootste gedeelte van de bijmenging vooral uit Al_2O_3 (40-50%) en CaO (40-50%). Het aandeel Fe_2O_3 ligt op 10% tot 20%. In 2019 blijft de verdeling grotendeels gelijk op 2 monsters na. Er is een lichte afname in CaO (30-40%). In 2020 ontstaat een grotere verdeling van de monsters waarbij 2 monsters een afname in CaO vertonen (30-40%) en 1 monster een toename van CaO (50-60%). Voor Fe_2O_3 neemt 1 monster toe (20 tot 30%) en 1 monster af (0 tot 10%). Tenslotte blijkt uit Figuur 5-11 dat de verhouding Al-Ca 50-50 is, ijzer is minder dominant in de bijmenging.



Figuur 5-11 Driehoeksdigram Al_2O_3 , CaO en Fe_2O_3 . Dit figuur is als volgt af te lezen. Over de horizontale lijnen wordt Al_2O_3 afgelezen. De verticale lijnen die vooruit staan zijn voor CaO en de verticale lijnen die achteruit staan zijn voor Fe_2O_3 . De punten van de driehoek staan voor 100% van de stof.

5.2.1.2 Al_2O_3 plots

De resultaten van de Al_2O_3 plots van de vaste stof monsters zijn weergegeven in Figuur 5-12. Er is een stabiele trend tussen de ionen, de samenstelling is homogeen. Deze stabiele trend geldt niet voor CaO , Na_2O en TiO_2 . Uit de Al_2O_3 plots volgt dat de variatie afhankelijk is van de hoeveelheid zand. IJzer is in dit geval aanwezig in de vorm van ijzeroxide. Verder heeft het bijgemengde materiaal van het zand 1 bron heeft omdat de samenstelling zeer homogeen is. Verschillen in de bodemsamenstelling tussen de compartimenten worden niet veroorzaakt door het slib waarmee de vakken zijn gevuld.



Figuur 5-12 Al_2O_3 plots van vaste stof monsters

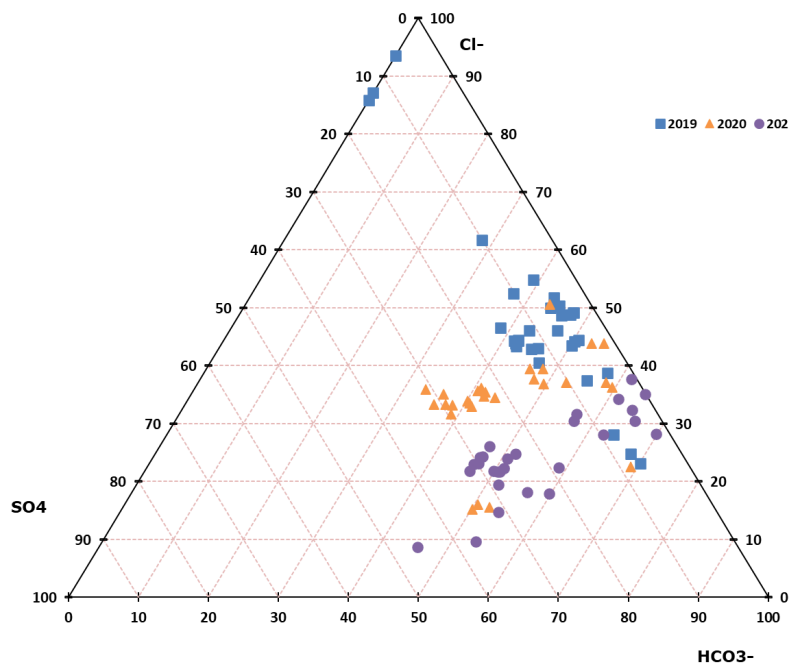
Doordat de keuze gemaakt is om holocene kleien te gebruiken en de bijdrage van het hierboven geëvalueerde vooraf bedachte materiaal voor de dunslibdepos beperkt is. Er is geen chemische data beschikbaar over de holocene kleien gebruikt in de slibdepos, rest ons niks anders dan aan te nemen dat holocene kleien homogeen zijn en dat eventuele verschillen tussen de verschillende slibcompartimenten veroorzaakt worden door verschillen zand/klei fracties.

5.2.2 Poriewater

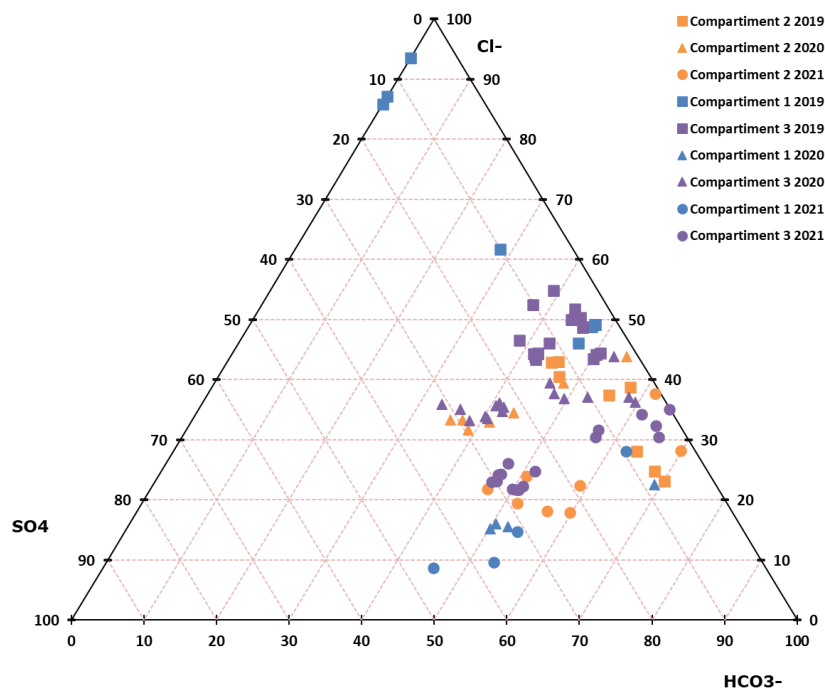
De aanname die wordt gedaan is dat de gemeten verschillen tussen de drie verschillende slibcompartimenten wordt veroorzaakt door omstandigheden.

De analyse van de chemie van het poriewater is net als vaste stof weergegeven in driehoekdiagrammen. Uit Figuur 5-13 is de gehele data set geplot tegen sulfaat (SO_4^{2-}), chloride (Cl^-) en bicarbonaat (HCO_3^-). In 2019 is het chloride gehalte ongeveer 50-50 met bicarbonaat. Er zijn een paar outliers die meer bicarbonaat bevatten en outliers die geen bicarbonaat bevatten. Deze verdeling verandert sterk in 2020, de verhouding bicarbonaat-chloride blijft gelijk maar sulfaat wordt dominantier. De verhouding bicarbonaat-sulfaat wordt 50-50. In 2021 wordt sulfaat nog dominantier en verandert de verhouding chloride-bicarbonaat naar 40-60.

Figuur 5-14 laat zien uit welke compartimenten de monsters komen. Blauw komt uit compartiment 1, Oranje uit compartiment 2 en paars uit compartiment 3. De vorm van het monster laat zien uit welk jaar deze komt. Vierkant komt uit 2019, driehoek uit 2020 en cirkel uit 2021. Een blauwe driehoek is dus een monster uit compartiment 1 genomen in 2020.



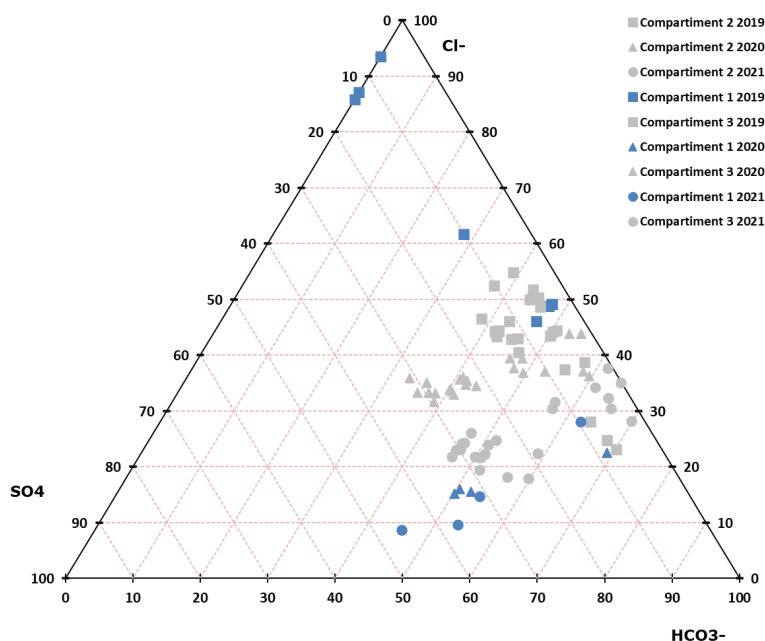
Figuur 5-13 Driehoekdiagram van Cl^- , SO_4^{2-} en HCO_3^-



Figuur 5-14 Driehoekdiagram van Cl⁻, HCO₃⁻ en SO₄²⁻. Er is hier onderscheid gemaakt tussen de verschillende compartimenten.

5.2.2.1 Compartiment 1

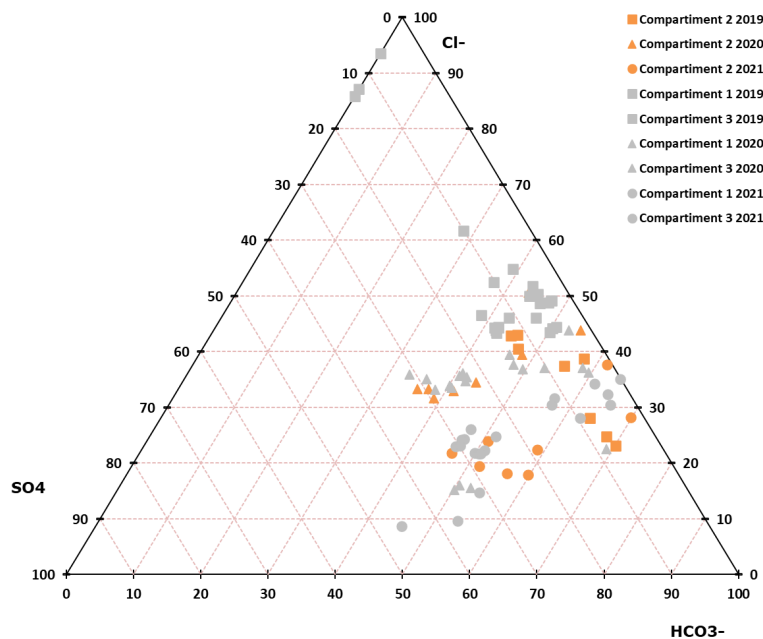
Uit Figuur 5-15 blijkt dat in 2019 compartiment 1 een grote spreiding van data heeft. Er zijn monsters die geen bicarbonaat bevatten en monsters die voor ongeveer 50% uit bicarbonaat bestaan. Sulfaat is nog niet sterk aanwezig in 2019. In 2020 neemt de verhouding chloride-bicarbonaat af naar 40-60 en wordt sulfaat dominant. De verhouding tussen bicarbonaat en sulfaat ligt rond de 50-50. In 2021 zet deze trend van 2020 zich voort waarbij er een afname is van chloride en een toename van sulfaat,



Figuur 5-15 Driehoekdiagram compartiment 1

5.2.2.2 Compartiment 2

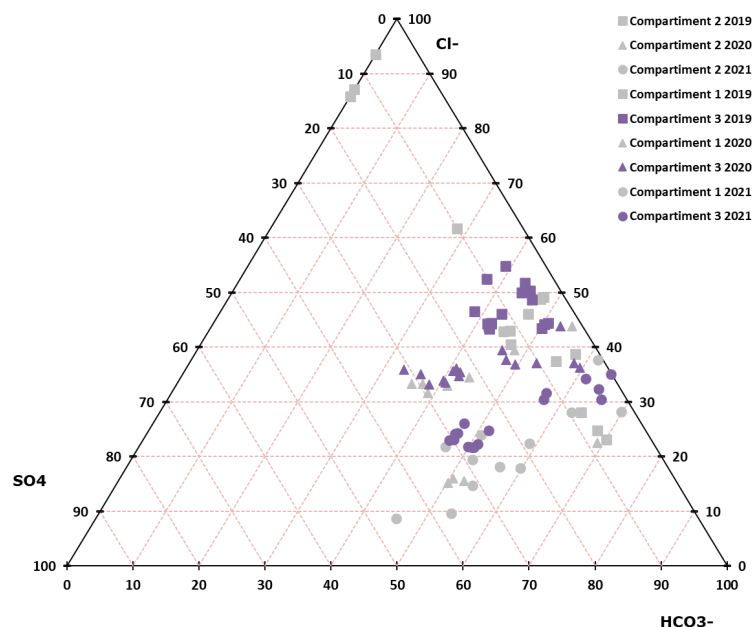
Compartiment 2 is vergelijkbaar met compartiment 1 in 2020 (Figuur 5-16). In 2019 daarentegen liggen de verhoudingen in compartiment 2 anders. De verhouding chloride-bicarbonaat is ongeveer 50-50 met een kleine tweedeling richting sulfaat. Er is een sulfaat rijkere groep en een sulfaat armere groep. In 2021 neemt het aandeel bicarbonaat toe evenals het aandeel sulfaat.



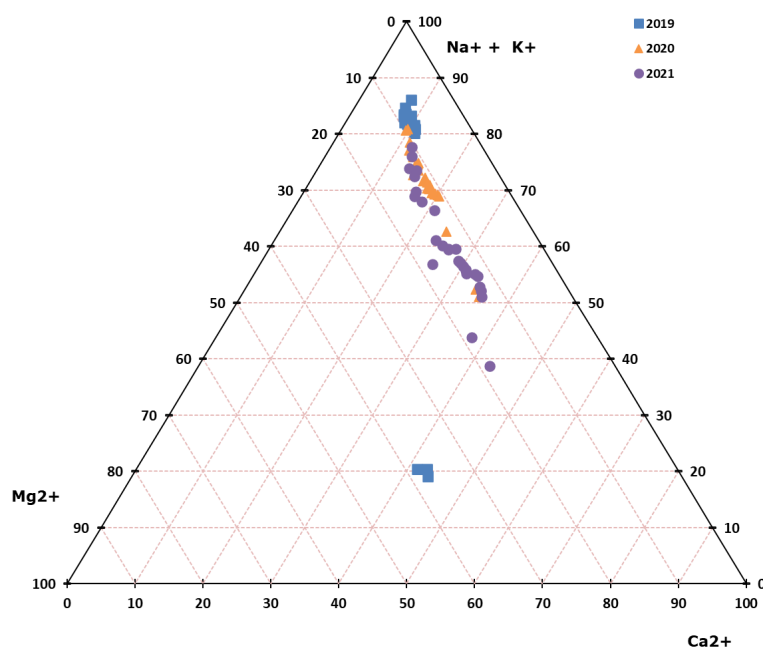
Figuur 5-16 Driehoeksdigram compartiment 2

5.2.2.3 Compartiment 3

In Figuur 5-17 staan alle monsters uit compartiment 3 over de tijd geplot. In tegenstelling tot de andere compartimenten is er in compartiment 3 de minste verandering over de tijd. De trend uit de andere compartimenten komt wel terug in compartiment 3. De concentratie chloride neemt af en de concentraties sulfaat en bicarbonaat nemen toe.



Figuur 5-17 Driehoeksdiagram compartiment 3



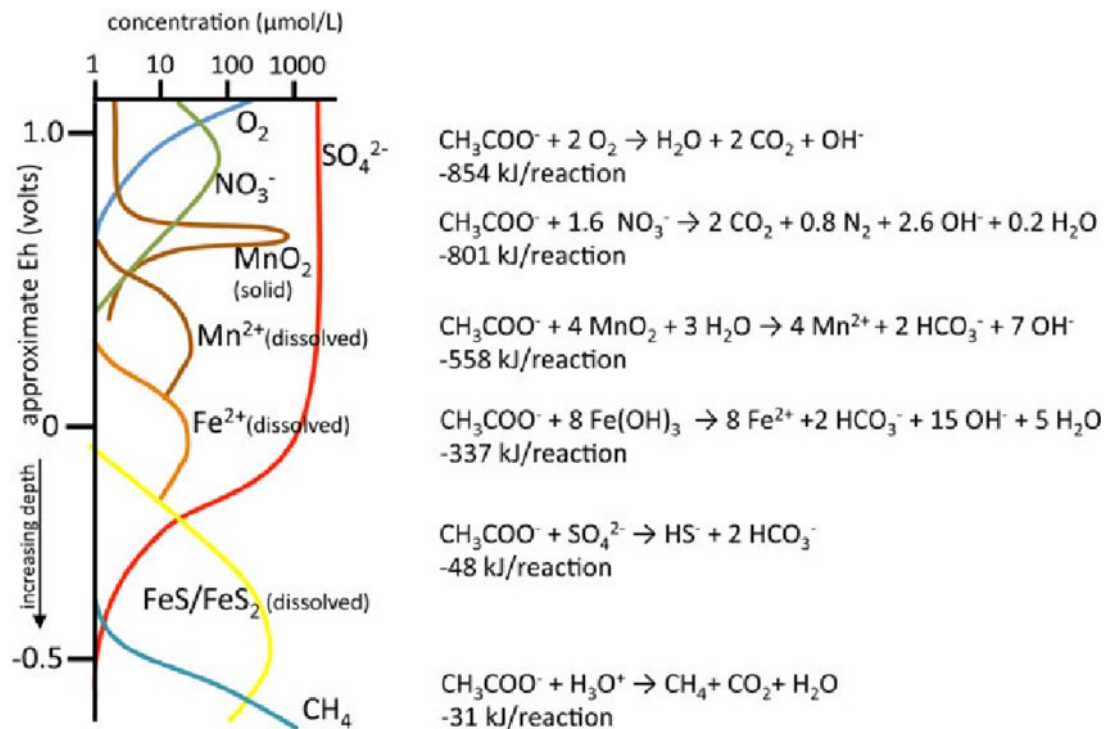
Figuur 5-18 Driehoeksdiagram van vrije kationen

Figuur 5-18 laat een overzicht van vrije kationen zien in het poriewater. Opvallend is dat door de tijd er een verandering is van een Na⁺ en K⁺ gedomineerd systeem naar een meer Ca²⁺ systeem. Het percentage Mg²⁺ blijft gelijk.

5.2.3 Verticale profielen samenstelling poriewater

Voor iedere locatie is de chemie van het porie water bepaald op verschillende dieptes. In 2019 is gestart met het vullen van de verschillende compartimenten. Omdat er niet genoeg slib uit de zandwinputten van de markerwadden gewonnen kon worden zijn de compartimenten gevuld met holocene klei. De begin samenstelling wijkt hierdoor af van de monsters uit de vaste stof. In de slibcompartimenten komen redoxreacties voor. Figuur 5-19 illustreert hoe deze reacties verlopen.

Voor de compartimenten 1, 2 en 3 zijn de stoffen nitraat, sulfaat, chloride, fosfaat en ammonium onderzocht op verschillende dieptes in 2019, 2020 en 2021. De resultaten hiervan worden in de volgende paragrafen besproken.



Figuur 5-19 Redox processen van de bodem. De processen verlopen volgens hoge gibbs energie naar lage gibbs energie. Bron: Konhauser, K. O. (2009). *Introduction to geomicrobiology*. John Wiley & Sons.

5.2.3.1 Compartiment 1

Compartiment 1 bestaat uit locaties 2 en 3. Deze locaties zijn onderzocht op nitraat, sulfaat, chloride, fosfaat en ammonium. Deze data is weergegeven over tijd en diepte.

Chloride

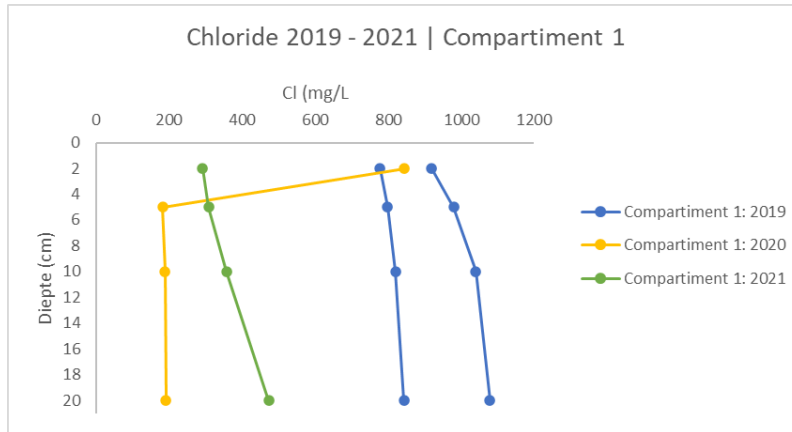
Chloride is een conservatieve stof, die vrijwel geen reacties met het slib/ sediment aangaat. De concentratie chloride in compartiment is gemeten vanuit poriewater (Figuur 5-20). In 2019 was dit ongeveer 790 mg/L en bleef dit vrijwel stabiel in de diepte. In 2020 zijn er hoge concentraties gemeten uit poriewater op 2 cm diepte. Dit kan te maken hebben met de graafwerkzaamheden in 2020 aan de kades rondom de compartimenten en dat het waterpeil zijn beloop kon gaan na juni 2020. In de diepte toont het poriewater in 2020 dezelfde trend als in 2019. De concentratie bleef ongeveer 200 mg/L.

In 2021 nam de concentratie chloride op 2 cm diepte ten opzichte van 2019 en 2020 af naar 210 mg/L. Op diepte nam deze concentratie toe naar 400 mg/L. Dit kan te maken hebben met het droogstaan van compartiment 1 zoals vermeld in Hoofdstuk 4.

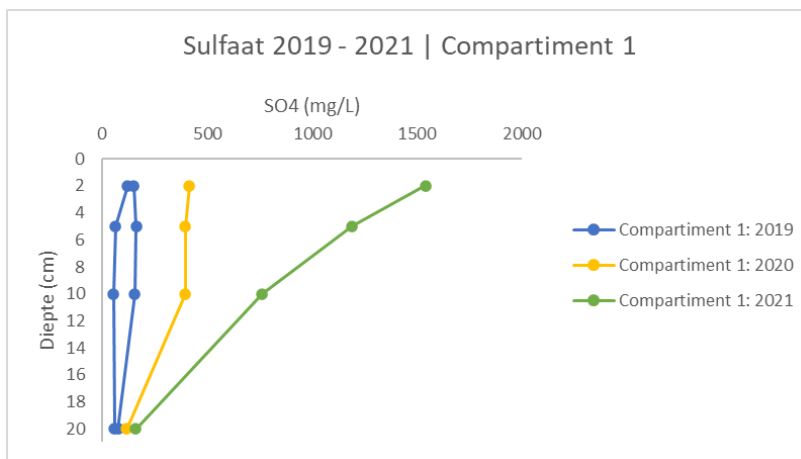
Sulfaat

Sulfaat is een redox gevoelig ion. Onder oxiderende omstandigheden wordt sulfide omgezet naar sulfaat. Onder gereduceerde omstandigheden wordt sulfaat gereduceerd naar sulfide. De concentratie sulfaat is gemeten vanuit poriewater (Figuur 5-21). Op het eerste gezicht lijkt het gemeten poriewater op 2 cm het meest variabel door de tijd en is de concentratie sulfaat op 20 cm bijna gelijk.

In 2019 is de concentratie sulfaat significant lager dan in 2020 of 2021, met name in de bovenste bodemlagen. In 2020 is er een toename in sulfaat naar 490 mg/L op 2, 5 en 10 cm diepte. In 2021 zijn er ook veranderingen van de concentratie in de diepte. In de bovenste 2 cm is de concentratie groter dan 1500 mg/L en neemt af naar 300 mg/l op een diepte van 20 cm (~300 mg/L). De grote verschillen tussen de jaren in de bovenste bodemlaag werd mogelijk veroorzaakt door het verschil in waterpeil in compartiment 1. In 2019 stond deze onder water, in 2020 werd het waterpeil losgelaten en in 2021 stond compartiment 1 als het ware droog (zie Hoofdstuk 4).



Figuur 5-20 Verloop van chloride over tijd en diepte in compartiment 1



Figuur 5-21 Verloop van sulfaat over tijd en diepte in compartiment 1

Nitraat

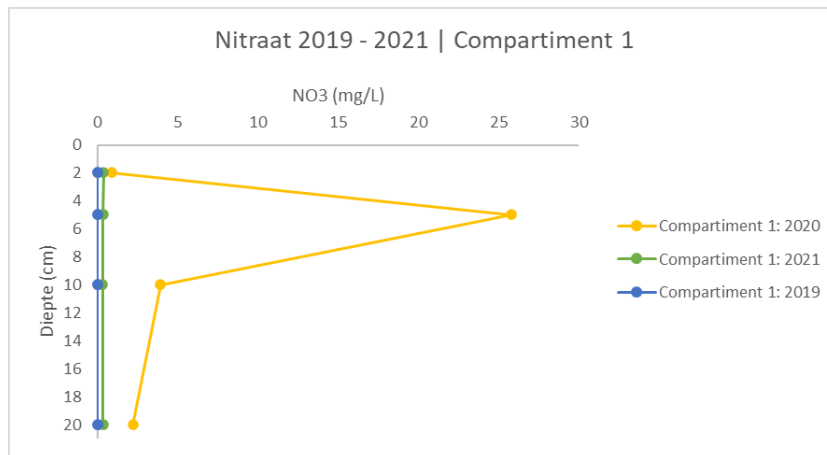
Nitraat is een redox gevoelig ion. Onder oxiderende omstandigheden wordt nitriet omgezet naar nitraat. Onder gereduceerde omstandigheden wordt nitraat gereduceerd naar nitriet.

De concentraties in 2019 en 2021 zijn nagenoeg gelijk. In 2020 is er een piek concentratie op 5 cm diepte van 25 mg/L (Figuur 5-22). Omdat deze piek veel lager is dan in de andere compartimenten wordt gedacht dat er een achtergrond concentratie nitraat aanwezig is in de compartimenten.

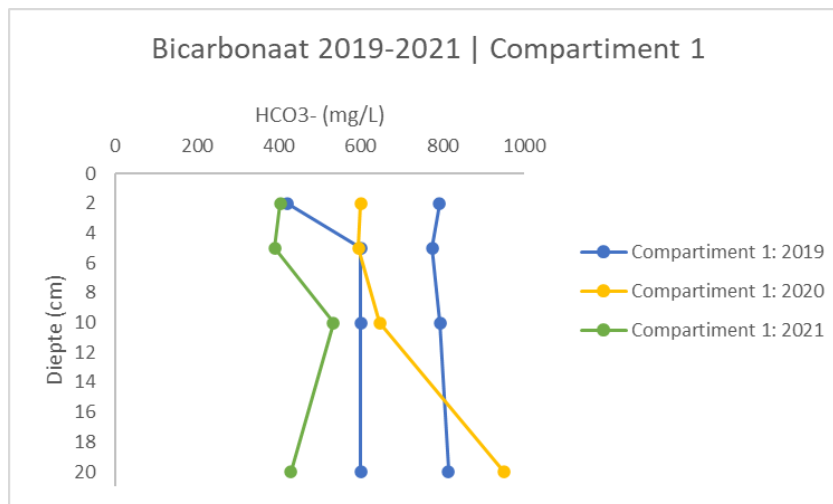
Bicarbonaat

Bicarbonaat wordt geproduceerd door het oxideren van organisch materiaal. Dit oxideren kan met alle in Figuur 5-19 beschreven oxidanten. Bij alle reacties weergegeven in figuur 13 wordt bicarbonaat gevormd. Onder methanogene omstandigheden wordt geen bicarbonaat meer geproduceerd.

De concentratie bicarbonaat is berekend zoals in reacties (1) en (2) (Figuur 5-23). De concentratie bicarbonaat in 2019 is hoger dan in 2020 en 2021 op locatie 3, er is over de tijd een afnemende trend van bicarbonaat. Over de diepte blijft de concentratie bicarbonaat stabiel. In 2020 is de concentratie bicarbonaat op 2 cm ~600 mg/L en heeft een toename in de diepte (concentratie op 20 cm: ~1000 mg/L). In 2021 blijft de concentratie relatief gelijk. De trends in dit figuur komen omgekeerd overeen met de trends van sulfaat voor compartiment 1. Dit kan komen door een reducerende reactie waarbij sulfaat wordt omgezet in sulfide en bicarbonaat (Figuur 5-19). Door sulfaat reductie en sulfide oxidatie treden er pH veranderingen op in het poriewater die kunnen reageren op de matrix die kunnen leiden tot ontgassing in bicarbonaat in de vorm van CO₂ uit het poriewater.



Figuur 5-22 verloop van nitraat over tijd en diepte in compartiment 1



Figuur 5-23 Verloop van bicarbonaat over tijd en diepte in compartiment 1

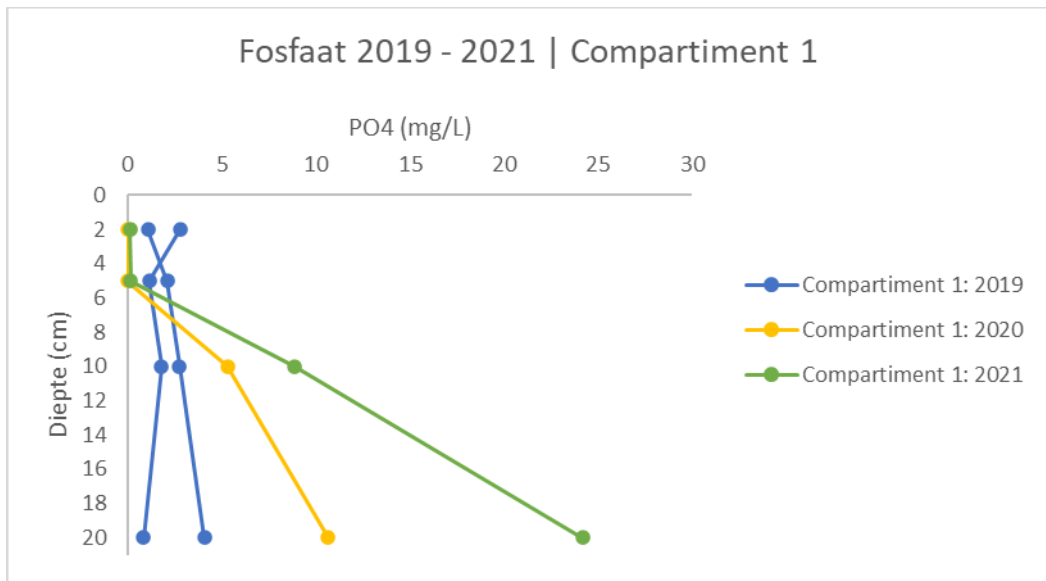
Fosfaat

In 2019 blijft de fosfaatconcentratie in compartiment 1 gelijk met de diepte, dit verandert in 2020 en 2021. Hier neemt de concentratie sterk toe met de diepte. Een oorzaak hiervan kan komen door ijzer reductie in het poriewater. Door deze ijzer reductie reactie komen er fosfaationen vrij wat de concentratie fosfaat in het poriewater verhoogd.

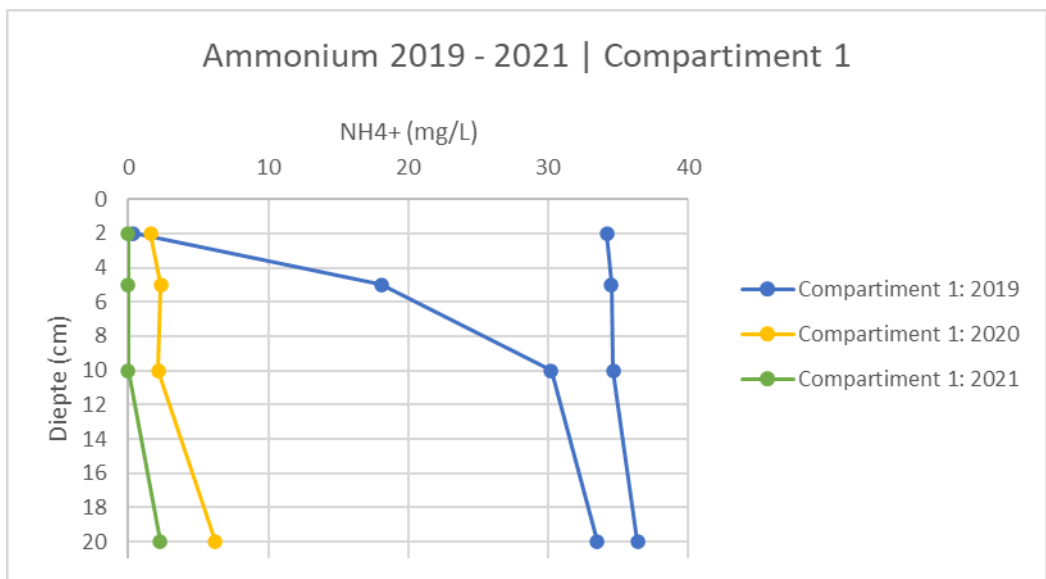
Ammonium

In 2019 zijn er grote veranderingen in ammonium (NH₄⁺) met de diepte. Op 20 cm diepte is deze concentratie toegenomen naar ongeveer 33 mg/L. In 2020 neemt deze concentratie sterk af en blijft deze met de diepte ook ongeveer gelijk. In 2021 zijn op 2 t/m 10 cm geen

meetbare concentraties NH_4^+ gemeten. Deze grote verschillen in ammonium kunnen verklaard worden doordat NH_4^+ een restproduct is van nitraat (NO_3^-) reductie. Daarnaast is NH_4^+ ook een product van OM afbraak.



Figuur 5-24 Concentratie fosfaat 2019-2021 in compartiment 1.



Figuur 5-25 Concentratie ammonium 2019-2021 in compartiment 1

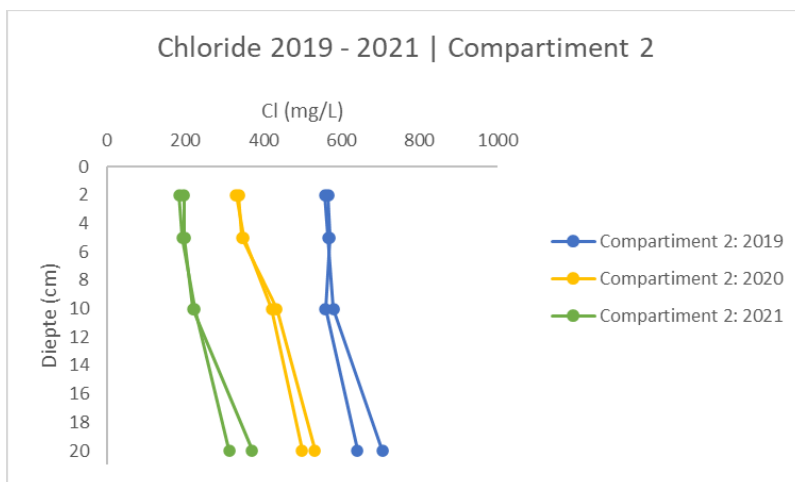
5.2.3.2 Compartiment 2

Chloride

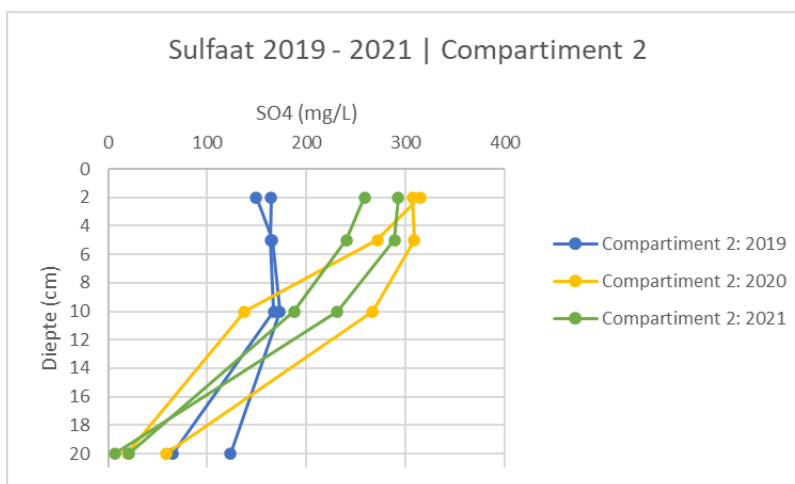
De chloride concentratie in compartiment 2 neemt met de tijd af net zoals in compartiment 1 (Figuur 5-26). In 2019 heeft chloride een concentratie van 580 mg/L in de bovenlaag. Deze concentratie neemt in 2019 toe met de diepte naar ~600 mg/L. In 2020 is deze concentratie lager in bovenlaag, namelijk 370 mg/L en neemt met de diepte toe naar 450 mg/L. In 2021 is de concentratie op 2 cm 200 mg/L en neemt deze toe naar 300 mg/L op 20 cm diepte.

Sulfaat

De sulfaat concentratie in compartiment heeft een ander verloop dan in compartiment 1 (Figuur 5-27). Vanaf 2019 neemt de concentratie sulfaat toe op 2 cm diepte, maar in de diepere lagen wordt de concentratie kleiner. Deze concentratie is lager ~3 keer dan in compartiment 1.



Figuur 5-26 verloop van chloride concentratie over tijd en locatie in compartiment 2



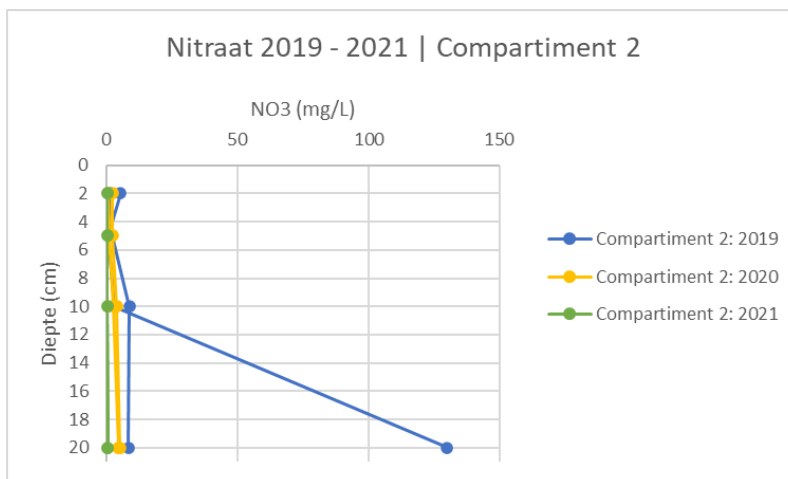
Figuur 5-27 Verloop van sulfaat over tijd en diepte in compartiment 2

Nitraat

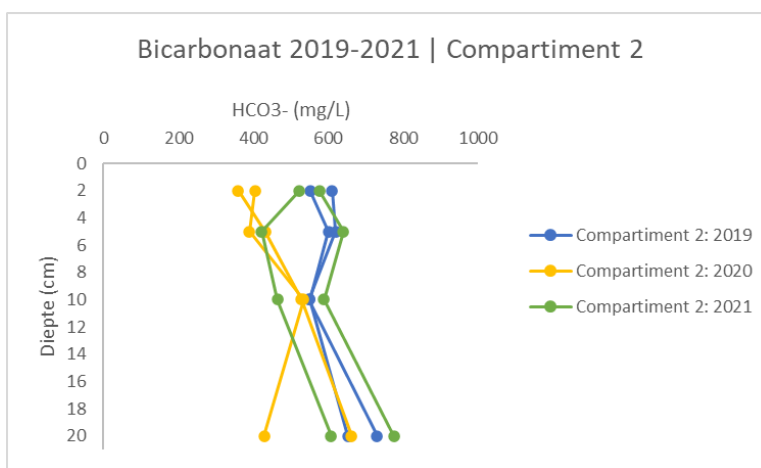
De concentratie nitraat lijkt stabiel in tijd en diepte (Figuur 5-28). In 2019 is er een forse toename van nitraat op 20 cm diepte. Hier neemt de concentratie nitraat toe naar 130 mg/L. Nitraat wordt hoger dan sulfaat aangetroffen op diepte door reducerende omstandigheden. Deze uitschieter kunnen we niet verklaren en daarom kunnen we niet uitsluiten dat het een meetfout is.

Bicarbonaat

De concentratie bicarbonaat (Figuur 5-29) is berekend op basis van de formules weergegeven in (1) en (2). Net zoals bij compartiment 1 vertoont de concentratie bicarbonaat een omgekeerde trend ten opzichte van sulfaat waarbij de concentratie toeneemt met de diepte. In 2019 is de concentratie 600 mg/L in de bovenste laag en neemt licht toe in de diepte, in 2020 en 2021 neemt de concentratie bicarbonaat in de bovenlaag af naar 400 tot 500 mg/L. In diepere lagen blijft de concentratie ongeveer gelijk.



Figuur 5-28 verloop van nitraat over tijd en diepte in compartiment 2



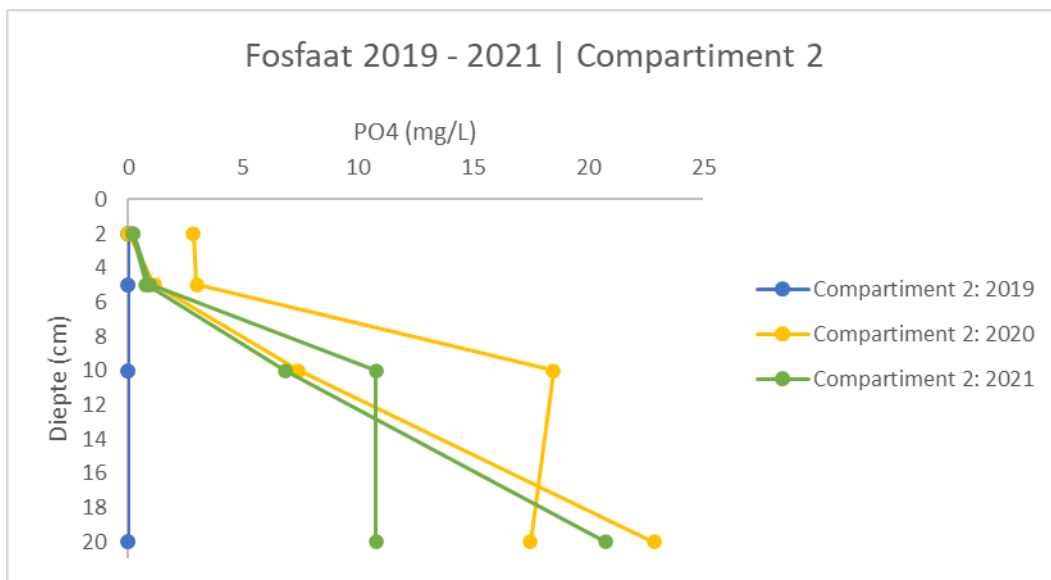
Figuur 5-29 verloop van bicarbonaat op verschillende tijd en dieptes in compartiment 2

Fosfaat

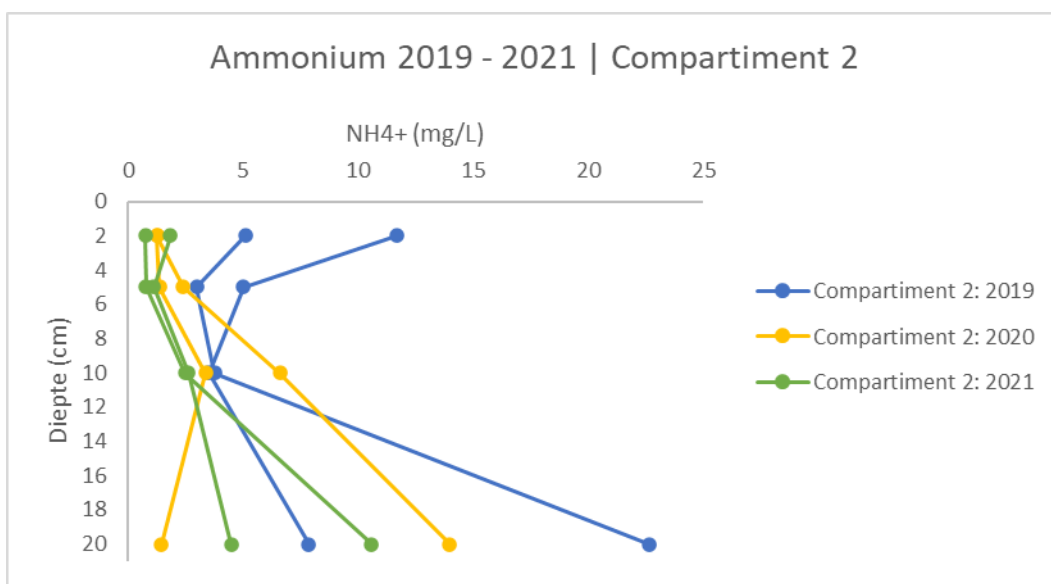
In 2019 is er geen meetbare concentratie fosfaat gemeten in compartiment 2. In 2020 en 2021 neemt deze concentratie fosfaat sterk toe, net zoals in compartiment 1. Op 10 cm diepte blijft de concentratie fosfaat gelijk voor locatie 5 in 2020 en locatie 4 in 2021. Deze verschillen in fosfaat concentratie op diepte is net zoals in compartiment 1 te wijden aan ijzer reductie in het poriewater waardoor er vrij fosfaat in het poriewater terecht komt.

Ammonium

In 2019 is de concentratie ammonium erg variabel. Vanaf 2 cm diepte neemt deze af om vervolgens op 10 cm diepte weer toe te nemen. De concentratie ammonium in 2020 en 2021 laten dezelfde trend zien als in compartiment 1 in 2020 en 2021. De veranderingen in ammonium kan komen door nitraat reductie of door OM afbraak.



Figuur 5-30 Concentratie fosfaat 2019-2021 in compartiment 2



Figuur 5-31 concentratie ammonium 2019-2021 in compartiment 2

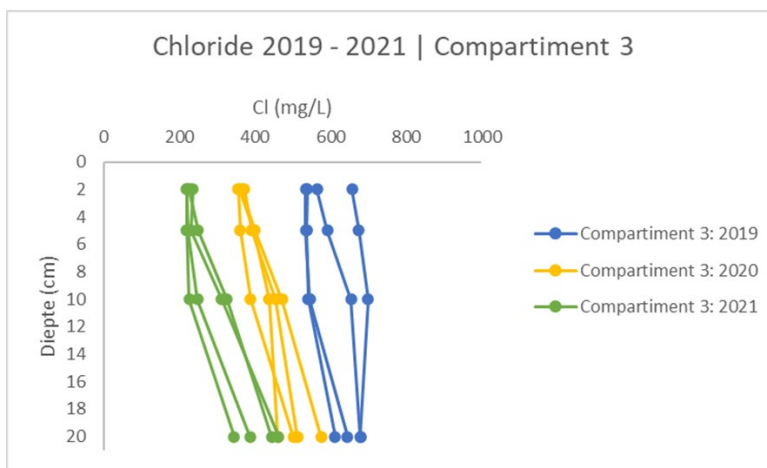
5.2.3.3 Compartiment 3

Chloride

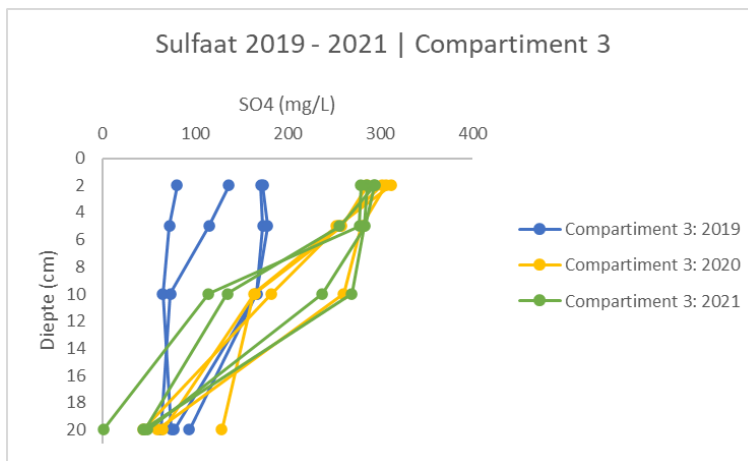
De concentratie chloride heeft net zoals in de vorige compartimenten een afnemende trend in de tijd (Figuur 5-32). Over de diepte is er een lichte toename ten opzichte van het eerste meetpunt op 2 cm diepte.

Sulfaat

De concentratie sulfaat neemt vanaf 2019 toe op 2 cm diepte (Figuur 5-33). Het verloop in de diepte zelf laat een afname zien richting een concentratie van ~150 mg/L. Verder toont 2021 een tweedeling in sulfaat op 10 cm diepte. De locaties met een grotere concentratie afname in sulfaat zijn locaties 10 en 11. Hieruit blijkt dat sulfaat verder gereduceerd is op deze locaties dan op locatie 8 en 9.



Figuur 5-32 Verloop van chloride over tijd en diepte in compartiment 3



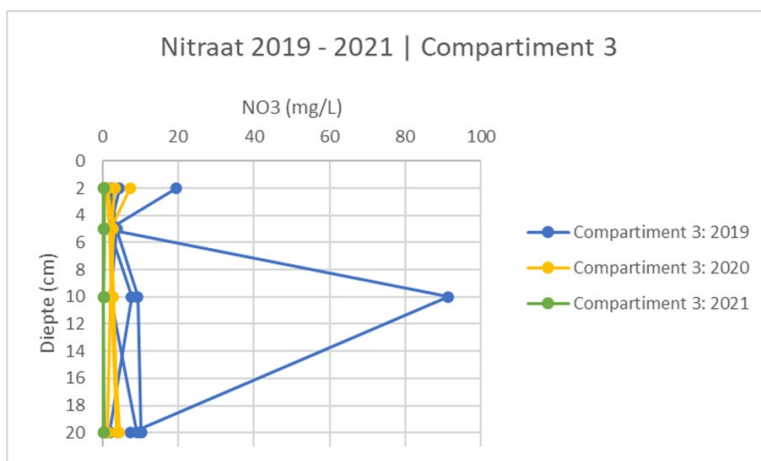
Figuur 5-33 verloop van sulfaat over tijd en diepte in compartiment 3

Nitraat

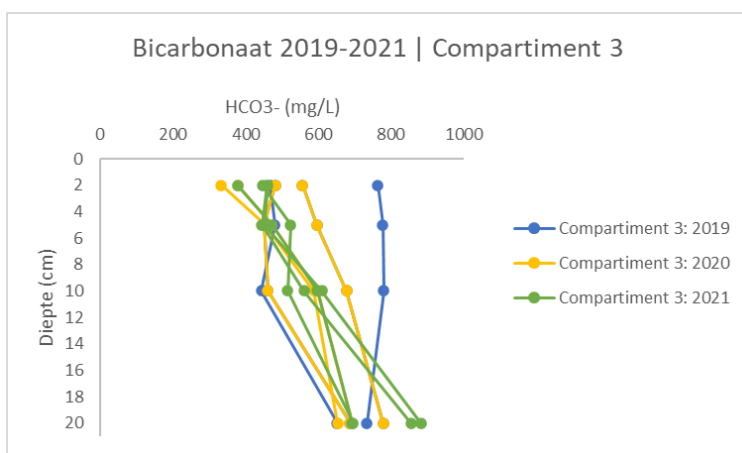
De concentratie nitraat in compartiment 3 is vrijwel gelijk over de periode 2019 tot 2021 (Figuur 5-34). In 2019 is er een piek op 10 cm diepte. Deze ligt hoger ten opzichte van de piek in compartiment 2. Dit zou betekenen dat in compartiment nitraat verder gereduceerd is dan in compartiment 3. Deze uitschieter kunnen we niet verklaren en daarom kunnen we niet uitsluiten dat het een meetfout is.

Bicarbonaat

De concentratie bicarbonaat neemt af vanaf 2019 in de bovenste laag (Figuur 5-35). Over de diepte is de concentratie vrijwel gelijk in 2019. In 2021 lijkt bicarbonaat omgekeerd sterk overeen te komen met sulfaat. Dit geldt ook voor 2020. In 2019 zijn de trends identiek wat zou kunnen betekenen dat er nog geen reductie plaatsvond van sulfaat.



Figuur 5-34 Verloop van nitraat over tijd en diepte in compartiment 3



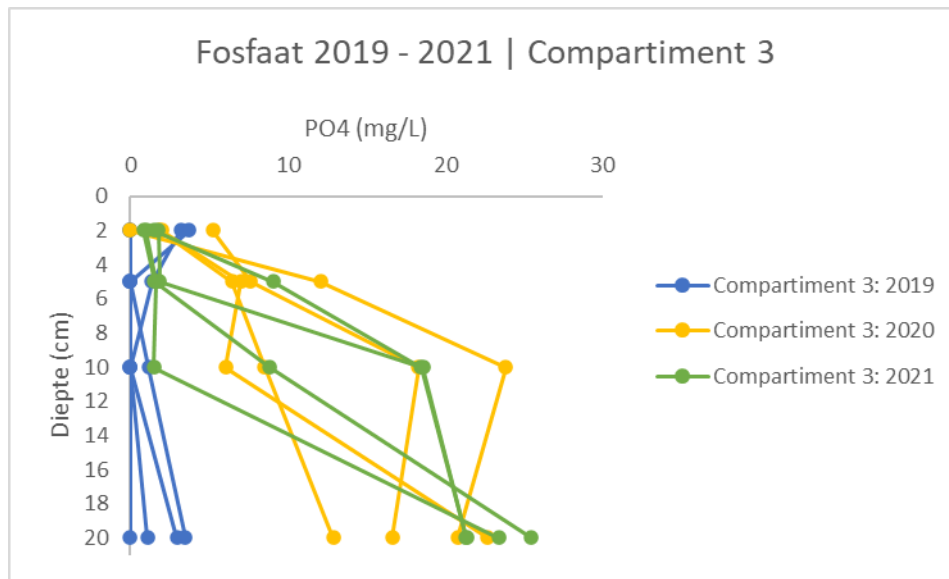
Figuur 5-35 verloop van bicarbonaat over tijd en diepte in compartiment 3

Fosfaat

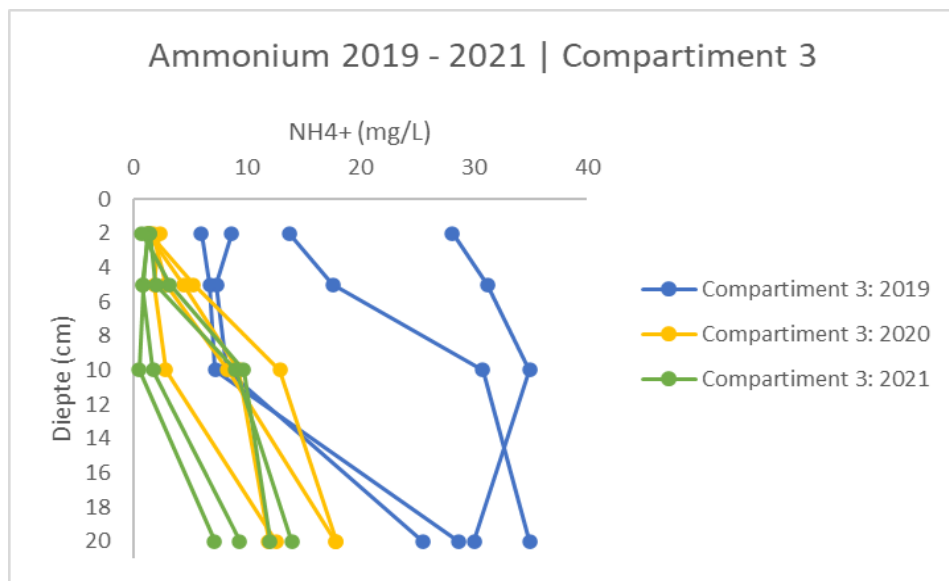
De concentratie fosfaat in 2019 is vergelijkbaar met de concentraties fosfaat in 2019 in compartiment 1 en 2 (figuur 44). De concentraties in 2020 en 2021 tonen weinig verschil in compartiment 3. Er is een toename in concentratie vanaf 5 cm diepte, vanaf 10 cm blijft deze concentratie of gelijk of neemt deze verder toe. Deze lokale verschillen zijn te wijden aan verschillen in ijzer reductie in het poriewater. Hierbij komt fosfaat vrij wat de gemeten concentraties weergeeft.

Ammonium

In 2019 is de ammonium concentratie over de 4 locaties zeer variabel (figuur 45). Op 2 cm zijn er lokale verschillen tussen 5 en 27 mg/L. In 2020 en 2021 zijn deze concentraties op 2 cm diepte vrijwel gelijk (~3 mg/L). Verder is er vanaf 10 cm diepte een toename in concentratie, tot 10 cm diepte verschillen de ze waardes weinig. Gemiddeld is er een afname van ammonium tussen 2019 en 2021. Dit kan duiden op vermindering van nitraat reductie in de ondergrond en toename van reductie van ijzer (figuur 44 & 45).



Figuur 5-36 fosfaat concentratie 2019-2021 in compartiment 3



Figuur 5-37 Ammonium concentratie 2019 - 2021 in compartiment 3

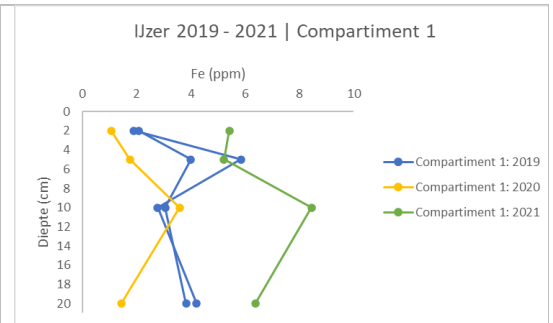
5.2.4 Reducerende metalen

De ijzer (Fe) en mangaan (Mn) concentraties in de verschillende compartimenten zijn weergegeven in Figuur 5-38 t/m Figuur 5-43. Om de reducerende vermoedens te ondersteunen van sulfaat laten de ijzer concentraties dezelfde 'knikken' zien als de sulfaat concentraties. Dit laat de reducerende omstandigheden zien op 10 cm diepte. Omdat dit

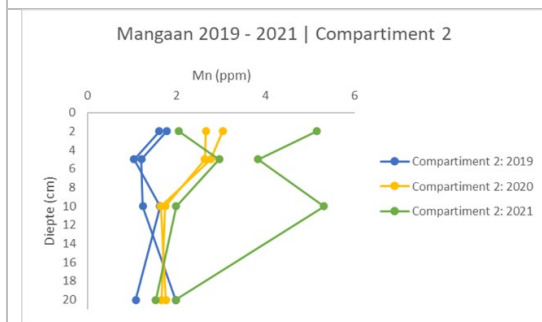
samen met ijzer gebeurd is het erg waarschijnlijk dat er pyriet vorming plaatsvindt op deze diepte. Mangan laat eenzelfde trend zien als IJzer. Het verschil tussen Fe en Mn zijn de reducerende omstandigheden. Wanneer Mn hoger is dan Fe hoort al het Fe gereduceerd te zijn (Myers & Nealson, 1988). Deze verschillen tussen Fe en Mn laten dus de verschillende redoxfronten zien op diepte.



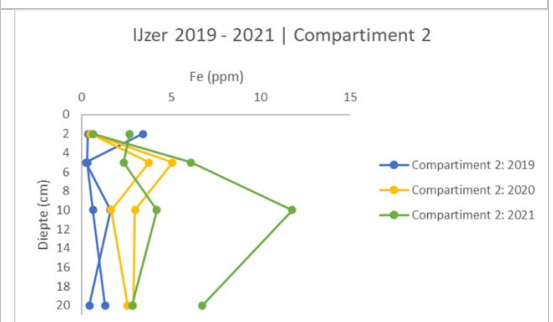
Figuur 5-38 Verloop van de mangaanconcentratie over tijd en diepte in compartiment 1



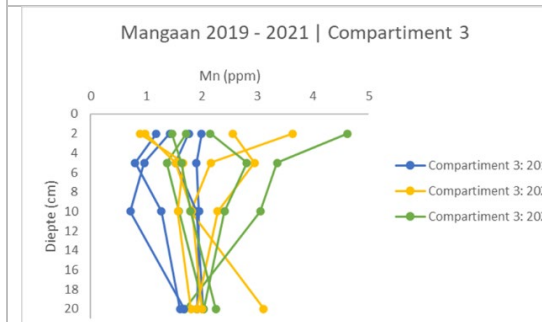
Figuur 5-39 Verloop van de ijzerconcentratie over tijd en diepte in compartiment 1



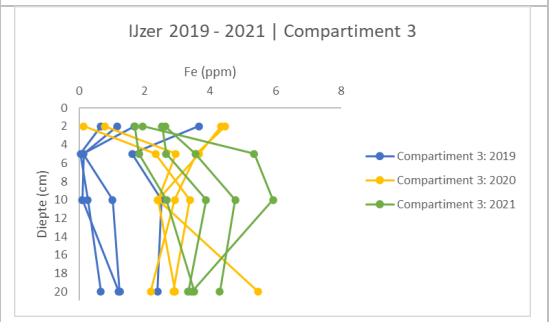
Figuur 5-40 Verloop van de mangaanconcentratie over tijd en diepte in compartiment 2



Figuur 5-41 Verloop van de ijzerconcentratie over tijd en diepte in compartiment 2



Figuur 5-42 Verloop van de mangaanconcentratie over tijd en diepte in compartiment 3



Figuur 5-43 Verloop van de ijzerconcentratie over tijd en diepte in compartiment 3

5.2.5 Conclusies

Vanuit de resultaten van het onderzoek zijn dit de belangrijkste vondsten:

- Materiaal toegepast in de dunslibdepots is homogeen qua chemische samenstelling. De variatie in chemische samenstelling wordt verklaard door zand/slib verhoudingen.
- Over de periode 2019 – 2021 neemt de concentratie chloride af. Dit zien we ook terug in de anion dominantie.
- Waar de chloride concentratie afneemt, neemt de sulfaat-bicarbonaat concentratie toe. Dit worden de dominante anionen.

- Poriewater direct na de aanleg in 2019 vertoont geen grote verschillen tussen de compartimenten 1 t/m 3. Binnen de compartimenten zijn er ook geen grote verschillen in de diepte.
- In 2020 en 2021 zien we redoxfronten ontstaan door afbraak van OM in de bovenste 20 cm in alle compartimenten:
 - Nitraat geeft een wisselend beeld wat niet geheel verklaard kan worden.
 - In compartiment 1 t/m 3 is mangaan vanaf een diepte van 2 cm gereduceerd en als Mn^{2+} opgelost in het poriewater.
 - In compartiment 1 is ijzer vanaf 2 cm gereduceerd. In compartiment 2 en 3 is ijzer gereduceerd vanaf 5 cm diepte.
 - In compartiment 1 t/m 3 wordt in de bovenste 10 cm sulfaat gevormd door oxidatie door het in slib het waarschijnlijk aanwezige pyriet. Op 20 cm diepte wordt sulfaat gereduceerd en slaat waarschijnlijk neer in de vorm van pyriet.
- Het oxideren van het OM door sulfaat, mangaan, ijzer en in mindere maten nitraat leidt tot oplossing-neerslagreacties in het slib wat invloed heeft op de sterkte, consolidatie en doorlatendheid van het materiaal. Hoe groot deze invloed is kan op basis van de huidige gegevens niet ingeschat worden.
- Door het vormen van redoxfronten in het slib wordt er fosfaat gemobiliseerd in het poriewater dit kan potentieel een positief (stimuleert), maar ook negatief (eutrofeert) effect hebben op planten groei.

5.3 In situ sterkte- en dichtheidsmetingen

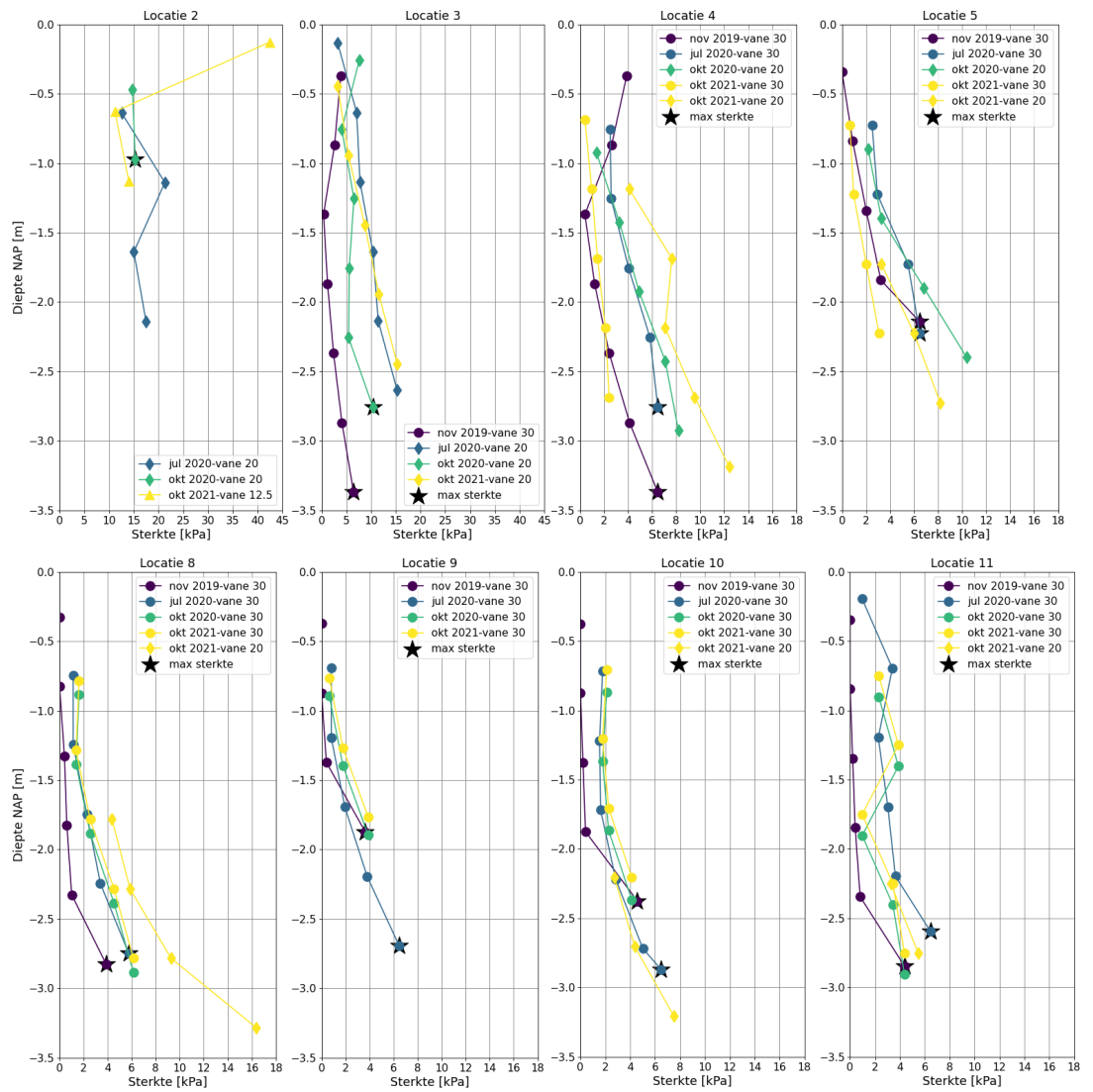
5.3.1 Ongedraineerde schuifsterkte

De ongedraineerde schuifsterkte is tijdens alle vier campagnes gemeten met behulp van een hand-vane en tijdens de eerste twee campagnes ook met een Rheotune. Zie Hoofdstuk 3.3 voor een beschrijving van deze instrumenten.

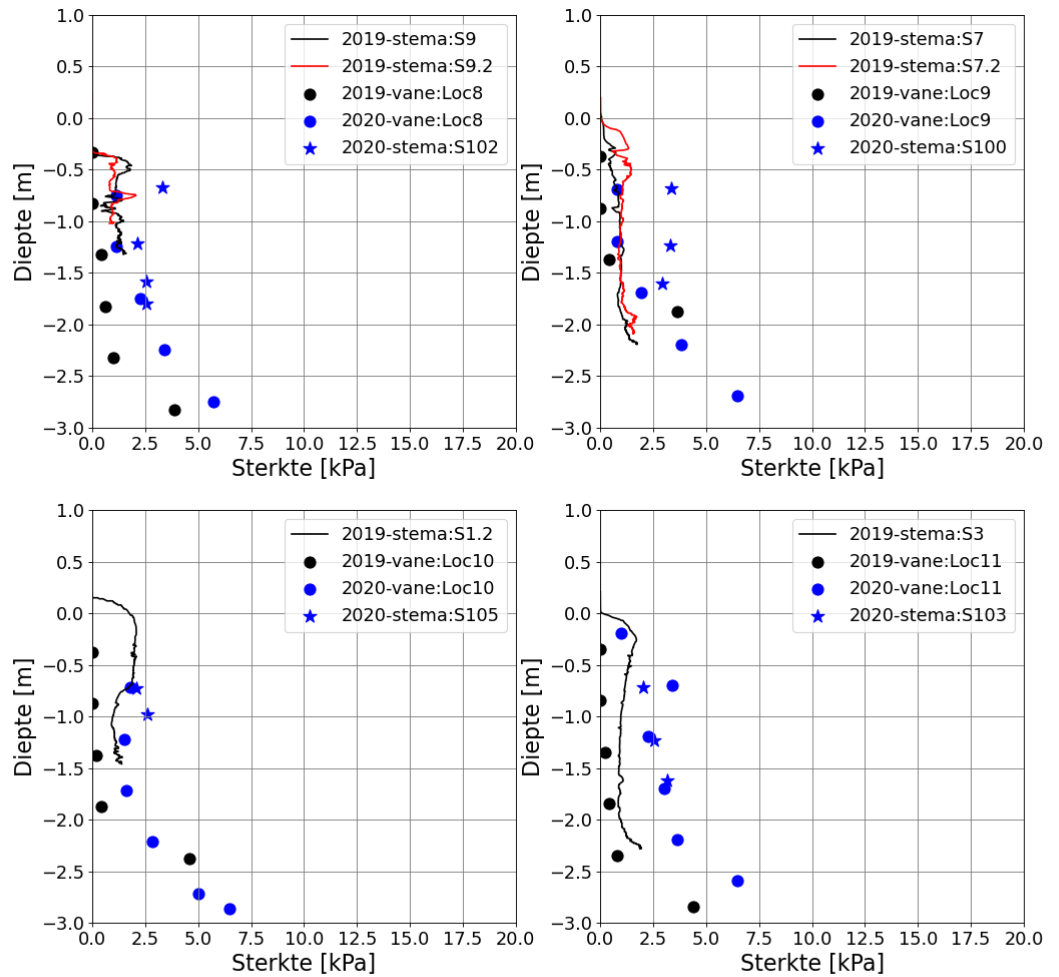
De resultaten met de hand-vane worden getoond in Figuur 5-44. Tijdens de metingen werd in sommige gevallen (met name onderin) de maximaal meetbare sterkte met de vane bereikt. Deze metingen zijn aangeduid met een ster.

De sterkte van het materiaal is onder andere gerelateerd aan de bulkdichtheid en het percentage droge stof. De sterkte neemt toe met de diepte en in tijd. In vak 1 is de gemeten bodemsterkte het hoogst. Dit is in overeenstemming met de hierin waargenomen hogere bulkdichtheid en het hogere zandgehalte. In vak 3 is de gemeten bodemsterkte het laagst. In vak 3 neemt de bodemsterkte sterk toe voor diepere lagen. In vak 1 en 2 is dit een geleidelijke toename.

De Rheotune is alleen gebruikt voor meetcampagnes 1 en 2 in vak 3. Hierna werd de grond te sterk voor deze meetmethode die specifiek is ontwikkeld voor nog vloeibaar of weinig geconsolideerd slib. De Rheotune metingen zijn vergeleken met de hand vane metingen van de dichtstbijzijnde locaties, zie Figuur 5-45. Beide meetmethodes laten een toename zien van de sterkte in diepte en tijd. De gemeten sterktes zijn in dezelfde range. Net als voor de dichtheid verschilt de gemeten sterkte. De verschillen zijn kleiner in vergelijking met de dichtheid omdat ook met de hand vane insitu wordt gemeten. Toch is het aannemelijk dat het verschil in methode leidt tot verschillen. Bij de hand vane metingen wordt telkens 1 m grond weggegraven en vervolgens wordt de vane gebruikt. Dit kan de grond lokaal verstoren.



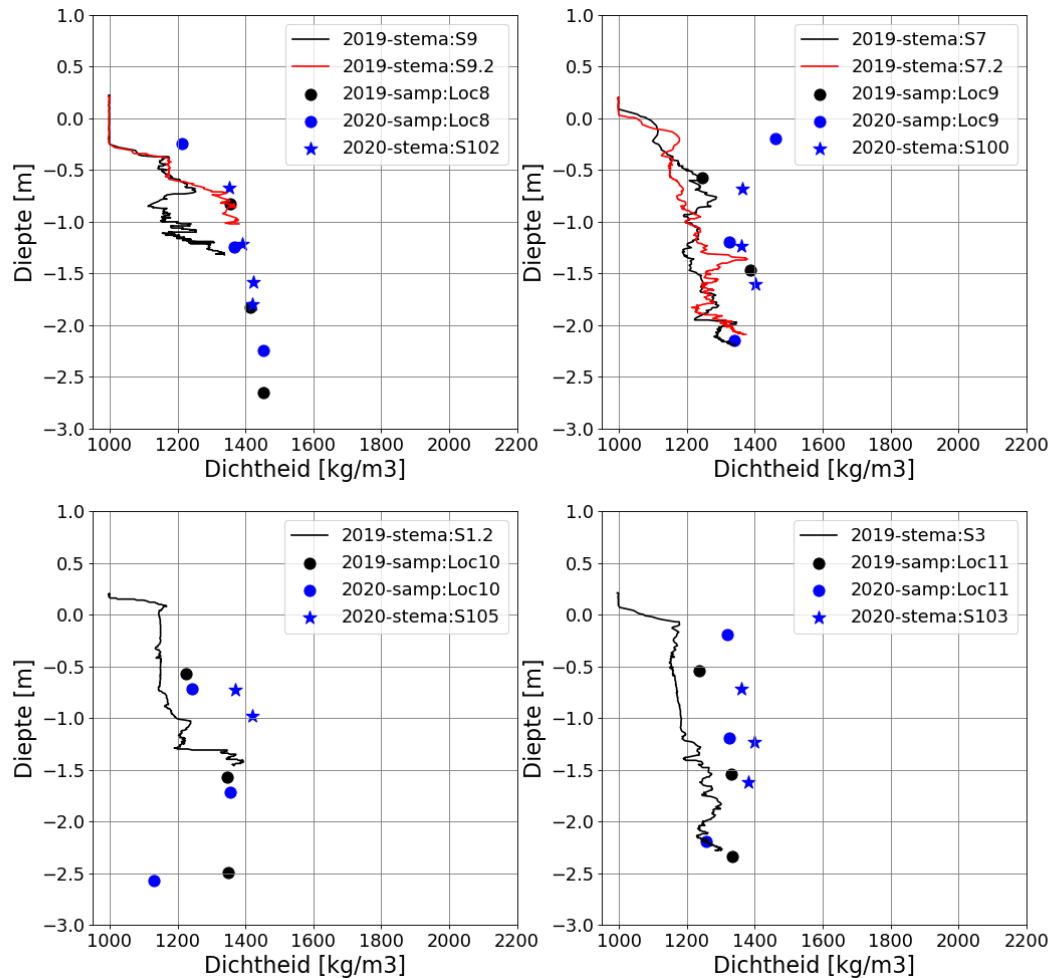
Figuur 5-44 Ontwikkeling in de tijd van verticale profielen van ongedraineerde schuifsterkte zoals gemeten met een hand-vane.



Figuur 5-45 Vergelijking tussen hand-vane en Rheotune-metingen in compartiment 3 in 2019 en 2020.

5.3.2 Dichtheid

Tijdens de eerste en tweede meetcampagne is met de Rheothune behalve de sterkte ook de dichtheid gemeten nabij locaties van de Beekersamples in vak 3. Beide type metingen zijn met elkaar vergeleken, zie Ook de Rheotune metingen laten zien dat de dichtheid van de grond toeneemt in diepere lagen en in tijd. De bulkdichtheid gemeten met de Rheothune is tot maximaal 200 kg/m³ lager dan de beekersample metingen. Dit komt hoogstwaarschijnlijk door het verschil in meetmethode. De Rheotune meet in situ. De beekersamples worden gestoken, getransporteerd en geanalyseerd. Bij deze handelingen kan het watergehalte afnemen en de bulkdichtheid toenemen. De verschillen in resultaten zijn groter voor de meetcampagne in 2019 dan in 2020 omdat in 2019 ook het watergehalte in de samples groter was en de kans op een verlies van water in de samples groter.



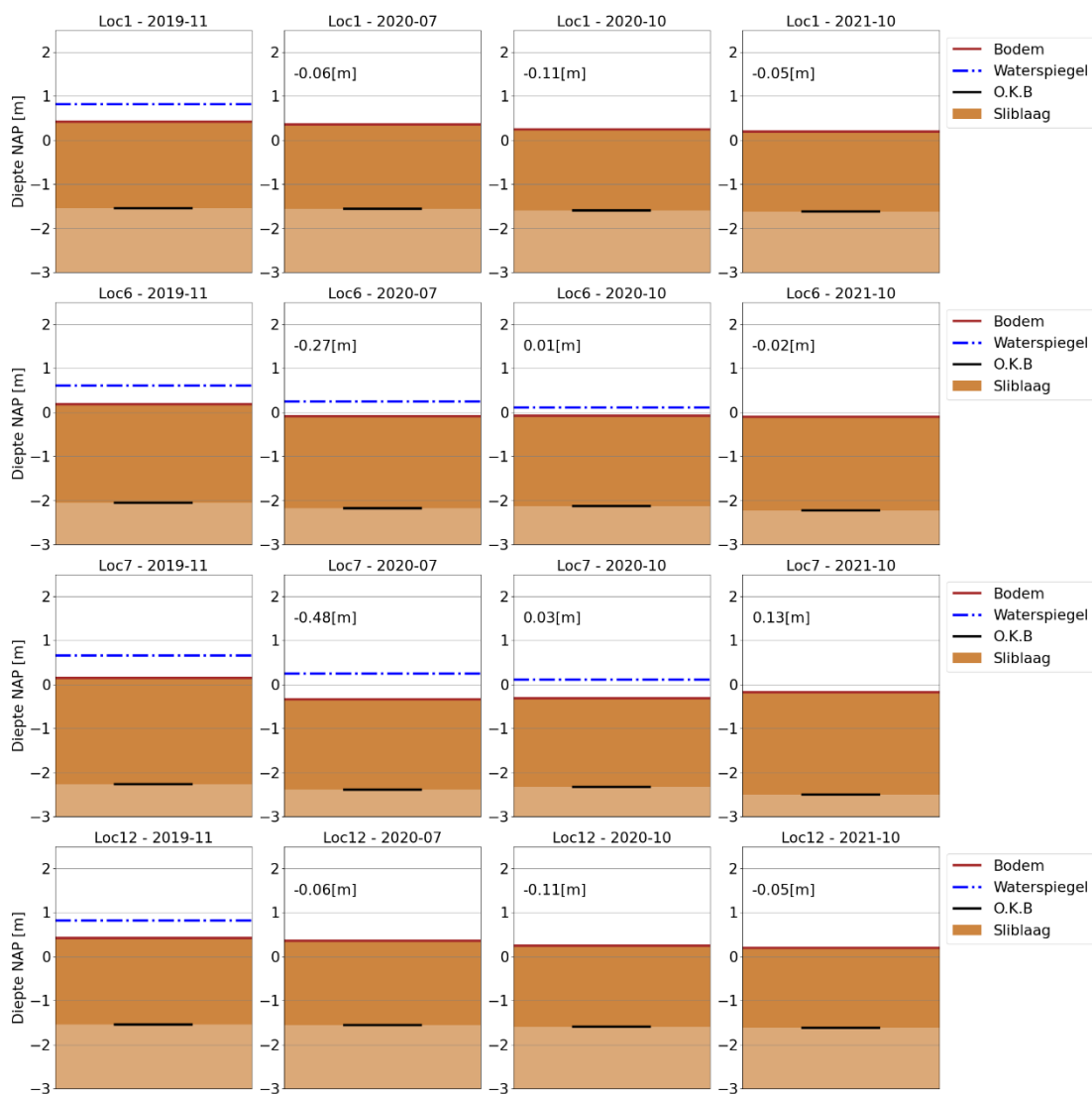
Figuur 5-46 Vergelijking tussen bulkdichtheid op basis van in-situ Rheotune-metingen en labtests op met de Beeker-sampler bemonsterde profielen in compartiment 3 in 2019 en 2020.

5.4 Resultaten zakking sliblaag en ondergrond

5.4.1 Zakbakens

In ieder vak is op 1 á 2 locaties met behulp van zgn. zakbakens de zakking gemeten van de sliblaag (t.g.v. eigengewichtsconsolidatie en rijping van de toplaag indien boven water) en van de ondergrond (t.g.v. zetting onder invloed van de bovenbelasting van de sliblaag), zie Figuur 5-47. Tijdens de eerste meting stond er een laag water in alle vakken. Voor vak 1 en 2 is de grootste zakking van de bodem meteen na de aanleg. Na meting 1 is vak 3 opgehoogd. Vlak voor of na deze ophoging is de bodemhoogte op de zakbaak niet ingemeten omdat de datum van de tweede vulslag niet vooraf is gecommuniceerd. Hierdoor is het niet te controleren hoe groot de initiële zakking was. Voor alle locaties daalt de bodem ca. 20 – 45 cm, ook bij locatie 12 na de tweede ophoging. De gemiddelde totale daling over 2 jaar is 30 cm. Bij locatie 7 ligt de bodem bij meting 2 lager dan bij meting 3 en 4. Dit wordt veroorzaakt door de tussentijdse herprofilering van de kades tussen de compartimenten die locatie 7 heeft verstoord. Voor locatie 6 wordt wel een geleidelijke daling van de bodem gemeten.

De gemeten bodemdaling is het resultaat van de zetting van de diepere onderlagen en de consolidatie van de gestorte sliblaag. De zetting van de ondergrond is af te leiden uit de zakking van de zakbakens. Tabel 5-1 toont de totale zakking van de bodem en de zakbakens tussen nov 2019 en okt 2021. Voor locatie 12 is de tweede meting als referentie genomen in verband met de extra storting van slib. De zetting van de ondergrond varieert tussen de 6 en 17 cm over twee jaar. De gemiddelde zetting is ongeveer 5 cm per jaar, waarbij er nauwelijks verschil is tussen het eerste en tweede jaar. De consolidatie van de sliblaag varieert tussen de 11 en 40 cm over twee jaar. De gemiddelde consolidatie is ongeveer 22 cm over twee jaar, waarbij het eerste jaar al het merendeel van de consolidatie optreedt (bijna 20 cm) en het tweede jaar nog slechts enkele cm. In het eerste jaar is het consolidatieproces van de sliblaag dus sterk dominant voor de totale zakking (en nog in sterkere mate als ook rekening wordt gehouden met de consolidatie tussen de eerste vulslag en de eerste meting), terwijl in het tweede jaar de zetting van de ondergrond de overhand krijgt.



Figuur 5-47 Positie en zakking van de sliblaag (donkere tint) en ondergrond (lichte tint) op basis van metingen aan de zakbakens.

Tabel 5-1: Resultaten van de metingen (t.o.v. NAP) met de zakbakens in de dunslibcompartimenten.

Locatie	Ligging onderkant baak [m]		Zetting ondergrond [m]	Ligging maaiveld [m]		Daling maaiveld [m]	Consolidatie sliblaag [m]
	2019	2021		2019	2021		
1	-1.55	-1.62	-0.07	0.42	0.2	-0.22	-0.16
6	-2.06	-2.33	-0.17	0.18	-0.1	-0.28	-0.11
7	-2.27	-2.33 ^a	-0.06	0.15	-0.31 ^a	-0.46	-0.40
12	-1.70 ^b	-1.86	-0.06	0.69 ^b	0.47	-0.22	-0.16

^avoor locatie 7 is de derde monitoring als eindpunt genomen vanwege latere versterking door herprofilering

^bvoor locatie 12 is de tweede monitoring als startpunt genomen vanwege de versterking door de tweede vulslag

5.4.2 Hoogteligging bovenkant sliblaag

De zetting van de ondergrond is alleen beschikbaar bij de posities van de zakbakens, maar de verticale ligging (en daling) als functie van tijd van het maaiveld is op alle bemonsteringslocaties beschikbaar, zie Tabel 5-2. Locatie 12 is sterk beïnvloed door de tweede vulslag in februari 2020, dus tussen de eerste en tweede monitoring in. Hierdoor is de bodem sterk omhoog gekomen in locatie 12 en zeer licht omhoog gekomen in locatie 11. Blijkbaar zijn daling en aanvulling hier ongeveer aan elkaar gelijk zijn. Tussen juli 2020 en oktober 2021 treedt op locaties 11 en 12 alsnog een daling op van respectievelijk -0.36 en -0.22 m.

De gemiddelde daling over twee jaar is circa 0.30 m (of 0.35 als rekening wordt gehouden met de tussentijdse verstoring in m.n. locaties 7 en 12). Dit is iets meer dan wanneer alleen naar de locaties met zakbakens wordt gekeken na dezelfde correctie (Tabel 5-1), waarvoor de gemiddelde daling ca. 0.30 m bedraagt. Dit is logisch doordat de overige locaties minder dicht langs de randen van de compartimenten ligging dan de locaties met zakbakens. Verder van de randen is de oorspronkelijke bodemhoogte lager. De aangebrachte sliblaag is hier dus bij aanvang iets dikker, waardoor meer daling is te verwachten. Door de beperktere invloed van de randen is de bijdrage van de zetting van de ondergrond hier waarschijnlijk wat minder en de bijdrage van de consolidatie van de sliblaag zelf wat meer. Dit kan echter niet met metingen worden aangetoond.

Tabel 5-2 Gemeten bodemhoogte en daling tussen november 2019 en oktober 2021 van de oppervlakte van de sliblaag [m+NAP] van alle locaties tijdens de vier meetcampagnes.

Meting	Locaties											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
nov-19	0.42	0.82	0.59	0.03	-0.09	0.18	0.15	-0.33	-0.07	-0.08	-0.06	0.15
jul-20	0.36	0.34	0.21	-0.28	-0.38	-0.09	-0.34	-0.45	-0.34	-0.24	-0.04	0.69 ^b
okt-20	0.25	-	0.21	-0.27	-0.38	-0.08	-0.31 ^a	-0.43	-0.38	-0.27	-0.24	0.61
okt-21	0.20	0.37	0.06	-0.19	-0.50	-0.10	-0.18	-0.53	-0.51	-0.44	-0.40	0.47
daling	-0.22	-0.45	-0.53	-0.22	-0.41	-0.28	-0.46	-0.20	-0.44	-0.36	-0.34	-0.22

^avoor locatie 7 is de derde monitoring als eindpunt genomen vanwege latere verstoring door herprofilering

^bvoor locatie 12 is de tweede monitoring als startpunt genomen vanwege de verstoring door de tweede vulslag

5.4.3 Ontwikkeling waterpeil

Zie rapportage Princen et al. (2022) en Figuur 4-3 in het huidige rapport.

5.4.4 Ruimtelijk dekkende bathymetrische survey

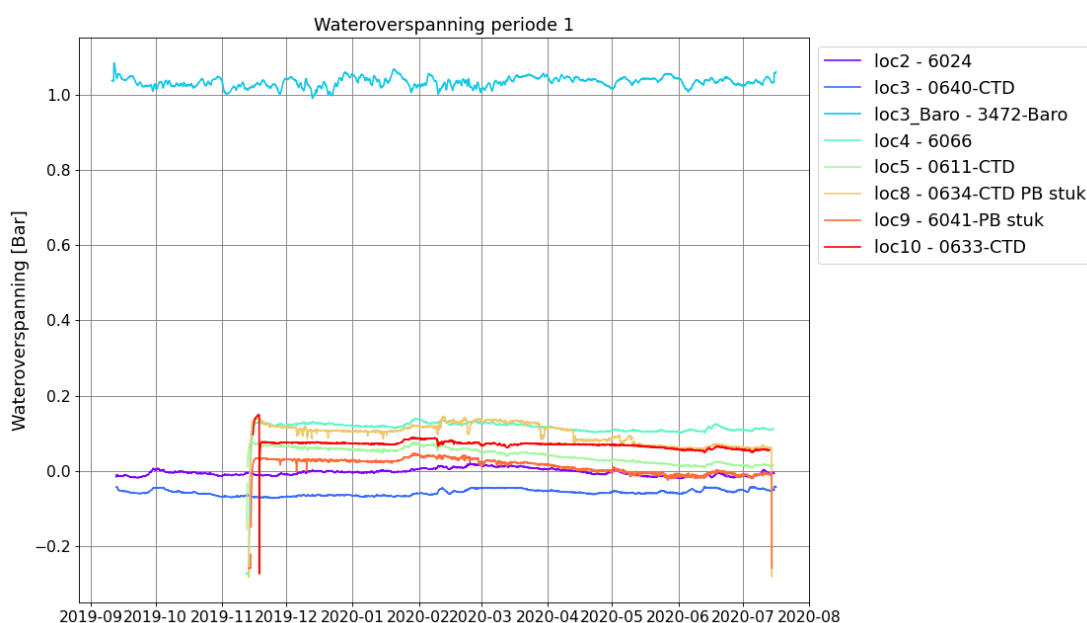
Naast de hoogtemetingen op vaste punten tijdens de vier monitoringscampagnes is er ook tweemaal een ruimtelijk dekkende bodemsurvey uitgevoerd, namelijk voor het vullen van de dunslibcompartimenten en ongeveer 1 jaar later. Deze resultaten zijn al eerder getoond in Figuur 2-1 en Figuur 4-2. Na een jaar ligt de bovenzijde van de sliblaag middenin compartimenten 2 en 3 op circa -0.5 m NAP en daarmee liggen deze compartimenten permanent onder water. Langs de randen van de compartimenten ligt de sliblaag hoger. Dit komt niet doordat de sliblaag hier dikker is, maar doordat de oorspronkelijke bodem hier hoger lag (zie Figuur 2-1). De bovenlaag van de slib- en zandlaag middenin compartiment 1 is circa +0.5 m NAP en daarmee staat dit compartiment grotendeels permanent droog. Dit verschil tussen compartiment 1 enerzijds en compartimenten 2 en 3 anderzijds wordt veroorzaakt door de bodem in compartiment 1 voor vulling al hoger lag (zie Figuur 2-1) en doordat hierin t.g.v. segregatie tijdens vullen een zand-slibmengsel met relatief hoge dichtheid is afgezet. Ruimtelijk gemiddeld is de sliblaag na een jaar nog ca. 2.7 m dik.

5.5 Resultaten waterdrukken

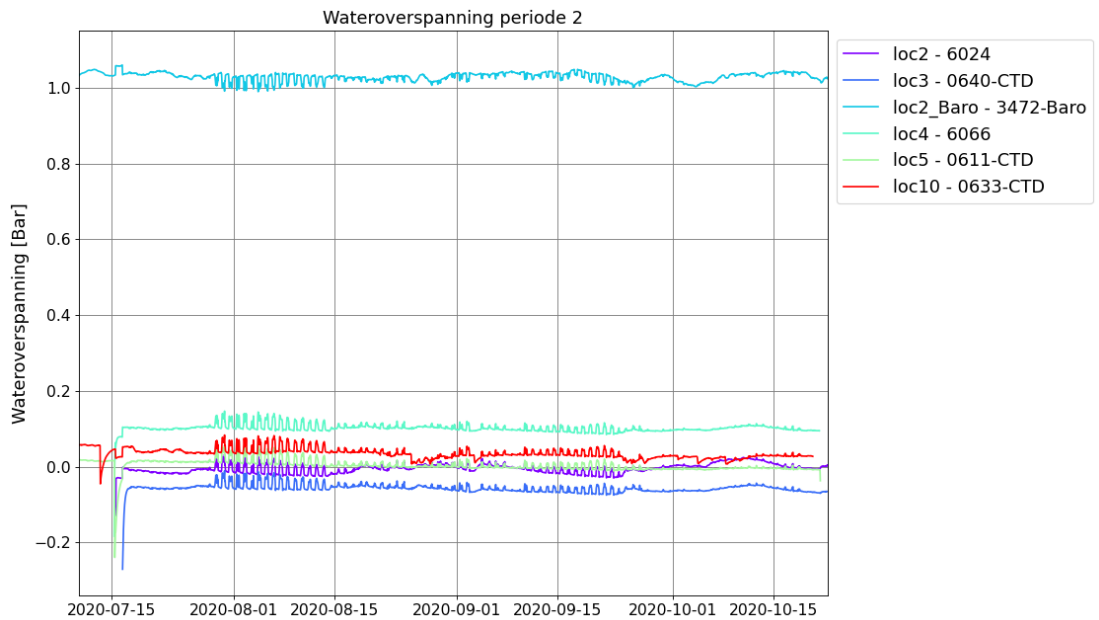
5.5.1 Drukmeters

De meetdata van de waterstanden in de peilbuizen wordt gegeven in Figuur 5-48 t/m Figuur 5-50.

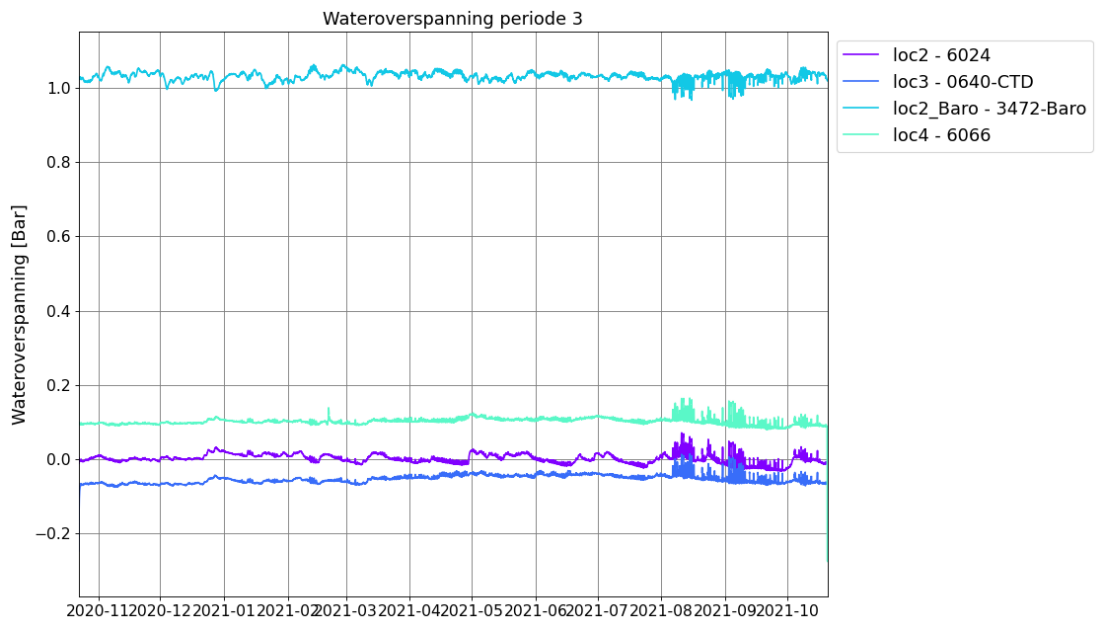
Hierin is de wateroverspanning weergegeven, d.w.z. het verschil tussen de waterspanning en de hydrostatische waterspanning. Aan het begin van de consolidatie direct na vulling van de compartimenten bedraagt de waterspanningoverspanning theoretisch maximaal $\Delta\rho \cdot g \cdot h$ met h de vulhoogte en $\Delta\rho$ het dichtheidsverschil tussen de slib suspensie en water. Bij een vulhoogte van 4.4 m en $\Delta\rho = 180 \text{ kg/m}^3$ is de wateroverspanning $180 \times 4.4 \times 9.8 = 7.8 \text{ kPa} \approx 0.1 \text{ bar}$. Aan het eind van het consolidatieproces is de wateroverspanning gelijk aan 0. Omdat niet alle referentiedrukopnemers goed hebben gewerkt en de waterstand in de compartimenten niet altijd hetzelfde was, kan de hydrostatische druk (en daarmee de wateroverspanning) niet altijd nauwkeurig worden bepaald. Niettemin duidt een dalende wateroverspanning bij aanvang op voortschrijdende consolidatie en betekent een afvlakkende of zelfs constante wateroverspanning dat consolidatie (bijna) voltooid is. Dit lijkt na 1 jaar in belangrijke mate het geval te zijn.



Figuur 5-48 Ontwikkeling van de waterdruk in de peilbuizen in de periode september 2019 – juli 2020.



Figuur 5-49 Ontwikkeling van de waterdruk in de peilbuizen in de periode juli 2020 - oktober 2020

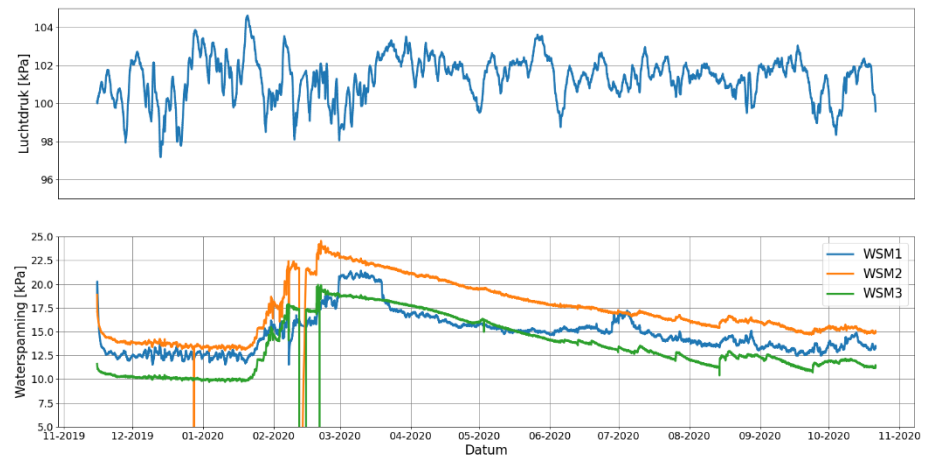


Figuur 5-50 Ontwikkeling van de waterdruk in de peilbuizen in de periode oktober 2019 – oktober 2021 voor de referetiedruk (loc2_Baro) en locaties 2 en 3.

5.5.2 Piëzometer

Figuur 5-51 toont de ontwikkeling van de waterspanning (zie ook §3.6.2) op locatie 12. Ten gevolge van de tweede vulslag in februari 2020 lopen de waterspanningen in korte tijd sterk om, om daarna over een periode van circa een half jaar grotendeels terug te lopen naar hun oorspronkelijke waarden. De meeste consolidatie vindt in deze periode plaats, hetgeen in overeenstemming is met de waarnemingen van de zakking van de sliblaag op locatie 12 (zie Tabel 5-2).

Waterspanningsmeters nov 2019 - okt 2020



Figuur 5-51 Ontwikkeling van de waterspanning op locatie 12 in de periode november 2019 – oktober 2020.

6 Discussie

Bij de discussie van de meetresultaten grijpen we terug op de hoofd- en deelvragen van deze studie zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 1:

Hoe kun je zo effectief mogelijk met slib en zand nieuwe habitats met natuurwaarden creëren?’

1.1: Wat is invloed van de vul- of opbouwmethode, dichtheid en samenstelling en vegetatieontwikkeling op de consolidatie en draagkrachtontwikkeling van het slib?

1.2: Hoe ontwikkelen we op de toplaag vegetatiebedekking met helofyten met voldoende biologische draagkracht?

Voor de beantwoording van 1.2 zie de rapportage van Princen en Kalle (2022) over het flankerende vegetatieonderzoek.

6.1 Vullen

Tijdens het vullen treedt segregatie op, dit is alleen te voorkomen als er slib met een veel hogere dichtheid (d.w.z. een veel lager watergehalte) zou worden toegepast. Dit vereiste een hele andere techniek voor winning en transport dan tot nu toe toegepast voor Marker Wadden die bij grote volumes minder efficiënt en kostbaarder is. Bij het ontwerp van de grote reguliere compartimenten is van tevoren rekening gehouden met deze segregatie. Voor het onderzoek in de kleinere compartimenten kon door de opgetreden segregatie en variatie in laagdikte de invloed van de dikte en samenstelling van de sliblaag op de consolidatie goed worden onderzocht. Wel was de laagdikte minder dan gepland, waardoor in combinatie met beperkingen in het peilbeheer uiteindelijk weinig slib boven water lag, wat het onderzoek aan korstvorming en vegetatieontwikkeling heeft bemoeilijkt. Aan het einde van het vulproces is de overloop van proceswater een aandachtspunt. Doordat de slibfractie langzaam bezinkt en de verblijftijd van het proceswater in de compartimenten korter wordt naarmate deze verder gevuld raken met slib, spoelt ook slib mee met het proceswater. Dit is inderdaad opgetreden, waardoor een tweede vulslag noodzakelijk was. Kwalitatief is dit vulgedrag goed bekend, maar kwantitatief blijkt het toch lastig om de mate van segregatie en spreiding van het slib te voorspellen, mede door variaties in de samenstelling en dichtheid van de vulstroom. Een adaptief vulproces werkt daarom het beste, waarbij monitoring van samenstelling van het uitstromende proceswater een aandachtspunt is.

In tegenstelling tot het oorspronkelijke plan zijn de onderzoekscompartimenten gevuld met holocene klei en niet met vers afgezet slib in de slibgeul of winputten. Omdat hierin minder zand is doorgemengd (segregatie heeft namelijk al grotendeels plaatsgevonden tijdens sedimentatie in de geul of put), zullen hiermee gevulde compartimenten vermoedelijk meer uniform zijn qua samenstelling en laagdikte. De sedimentatiesnelheid en dichtheid van slib in de slibgeul en winputten wordt toegelicht in Hanssen et al. (2022).

6.2 Consolidatie sliblaag

Van de oorspronkelijke gemiddelde laagdikte van ca. 4.4 m slib (dikte niet uniform en in 2 slagen aangebracht) is na ruim 2 jaar nog ca. 2.7 m over, d.w.z. 1.7 m zakking t.g.v. sedimentatie en consolidatie, inclusief een kleine bijdrage van ca. 0.1 m zetting van de ondergrond. Van de 1.6 m zakking van de sliblaag zelf treedt het merendeel op tussen vulling en de eerste meting na 3 maanden (ruim 1.3 m door een combinatie van bezinking en consolidatie), nog 0.2 m in het jaar hierna en nog slechts enkele cm in het daaropvolgende jaar. Het consolidatieproces is dus na 2.5 jaar grotendeels voltooid. De zetting van de ondergrond bedraagt jaarlijks ca. 5 cm en domineert vanaf het tweede jaar de gecombineerde zakking. In het eerste jaar is de zetting van de ondergrond van ondergeschikt belang.

De sterke afname van consolidatiesnelheid in het tweede jaar wordt bevestigd door metingen van de waterspanning en dichtheidsprofielen. Dichtheidsprofielen ontwikkelen zich nauwelijks meer tussen de laatste en voorlaatste meting en de waterspanning (de drijvende kracht van eigengewichtsconsolidatie) wijkt nauwelijks meer af van de hydrostatische druk. De gemiddelde bulkdichtheid in de slibrijke profielen van de compartimenten is ca. 1400 kg/m³ en in de profielen met veel zand (m.n. rondom het vulpunt in het eerste deelcompartiment) hoger. Dit betekent dat meer slib nodig is voor de vulling van de compartimenten dan waarvoor bij het ontwerp is uitgegaan. Grosso modo levert 1 m³ klei uit de Markermeerbodem ca. 1 m³ stabiel substraat voor wetlandontwikkeling, hoewel de dichtheid van de sliblaag vlak onder het waterpeil na consolidatie lager is dan de dichtheid van de gewonnen kleibodem. Dit komt doordat extra slib moet worden aangebracht om te compenseren voor de zetting van de ondergrond en doordat de dichtheid in de droge korst boven het Markermeerpeil (indien aanwezig) hoger is dan in de oorspronkelijke Markermeerbodem.

De waargenomen tijdschaal voor consolidatie en dichtheidsprofielen na 2.5 jaar kunnen met consolidatiemodellen worden gereproduceerd. De voorspellingen van deze modellen zijn sterk afhankelijk van de eigenschappen van de sliblaag, met name het verband tussen porositeit en doorlatendheid (sturend voor de tijdschaal) en het verband tussen porositeit en korrelspanning (sturend voor de einddichtheid). Deze verbanden zijn eerder al voor sediment uit het Markermeer bepaald (zie o.a. Barciela Rial, 2019 en Wichman et al., 2020), hoewel niet precies voor het in de dunslibcompartimenten toegepaste sediment.

De invloed van vegetatie op consolidatie lijkt beperkt (Princen en Kalle, 2022), de eerste jaren is consolidatie een dominant fysisch gedreven proces. De invloed van korstvorming is wel belangrijk, want hierdoor wordt de aandrijvende kracht voor consolidatie in de verzadigde sliblaag onder de korst vergroot door bovenbelasting en bovendien treedt in de korst door uitdroging een sterke verdichting op. Met peilbeheer is de consolidatiesnelheid dus gedeeltelijk stuurbaar, waarbij een hoog waterpeil de consolidatie vertraagt en een laag peil de consolidatie versnelt.

Hoewel consolidatiemodellen in hindcast goede resultaten geven, zijn in de praktijk voorspellingen toch onzeker gegeven de optredende variaties in sliblaagdikte, variatie in eigenschappen t.g.v. variaties in bronmateriaal, uitstroming en segregatie, variaties in de ondergrond en onzekerheden m.b.t. peilbeheer. Adaptieve op- en uitbouw biedt de mogelijkheid om voor deze onzekerheden te compenseren. Meer gevoeligheidsonderzoek vooraf naar de materiaaleigenschappen draagt ook bij aan de beperking van onzekerheden.

Deze resultaten van de onderzoekscompartimenten zijn consistent met die van de reguliere compartimenten (Cruz en Vijverberg, 2022). Hierin wordt een zakkingsnelheid van 0.25 – 0.2 m/jaar gerapporteerd voor hooggelegen delen (boven water) en 0.05 – 0.1 m/jaar voor

laaggelegen delen (onder water). In het eerste jaar na vullen is de zakkingsnelheid het grootst. Deze cijfers zijn een combinatie van eigengewichtsconsolidatie van de sliblaag en zetting van de ondergrond. In het KIMA-onderzoek zijn deze bijdragen te onderscheiden.

6.3 Zetting ondergrond

Zetting van de ondergrond wordt in deze discussie apart genoemd omdat dit een ander proces is met een veel langere tijdschaal dan de consolidatie van de hierop aangebrachte sliblaag. Wel wordt deze zetting veroorzaakt door de extra bovenbelasting t.g.v. deze sliblaag en treedt meer zetting van de ondergrond op naarmate de sliblaag dikker is en een groter deel hiervan een korst vormt boven water. Analyse van de zetting van de ondergrond was geen onderdeel van het KIMA-onderzoek. Voor zettingsanalyse wordt verwezen naar Boskalis (2022). Wel is de zetting onder de onderzoekscompartimenten gemeten om te kunnen welk deel van de zakking van de sliblaag wordt veroorzaakt door consolidatie van deze laag zelf en welk deel door zetting van de ondergrond. De zetting van de ondergrond van deze compartimenten bedraagt ca. 10 cm over 2 jaar, waarbij de zetting over het eerste en tweede jaar beide ongeveer 5 cm bedraagt. Omdat de zakkakens om praktische redenen (plaatsing met een kraan) relatief dichtbij de zandige kades staan, wordt deze waargenomen zetting vermoedelijk niet alleen veroorzaakt door de bovenbelasting van de sliblaag maar ook van de zandige kades.

7 Conclusies

Compartimenten zijn gevuld met ca. 440.000 m³ Holocene klei met lage initiële dichtheid (ca. 1180 kg/m³) verdeeld over 2 vulslagen (juli 2019 365.000 m³ en februari 2020, ca. 75.000 m³). De drie compartimenten zijn door middel van openingen in de kades gekoppeld en werden vanaf één punt gevuld dat een paar keer is verplaatst (van compartiment 1 naar 2 tijdens de eerste vulslag en naar 3 bij aanvang van de tweede vulslag).

De consolidatie van de sliblaag is gevolgd door o.a. het meten van de hoogteontwikkeling en de dichtheidsprofielen. Hierbij is de hoogteontwikkeling gecorrigeerd voor de zetting van de ondergrond die ook optreedt.

Tijdens het vullen treedt sterke segregatie op, waarbij zandiger materiaal m.n. terecht komt dichtbij het vulpunt en het slibrijke sediment met een hoger organisch gehalte over een grote afstand uitstroomt. Van de oorspronkelijke gemiddelde laagdikte van ca. 4.4 m slib (dikte niet uniform en in 2 slagen aangebracht) is na ruim 2 jaar nog ca. 2.7 m over, d.w.z. 1.7 m zakking t.g.v. sedimentatie en consolidatie, inclusief een kleine bijdrage van ca. 0.1 m zetting van de ondergrond.

De consolidatiesnelheid neemt in het tweede jaar sterk af, hetgeen wordt bevestigd door metingen van de waterspanning en dichtheidsprofielen. Dichtheidsprofielen ontwikkelen zich nauwelijks meer tussen de voorlaatste en laatste meting en de waterspanning (de drijvende kracht van eigengewichtsconsolidatie) wijkt nauwelijks meer af van de hydrostatische druk. De gemiddelde bulkdichtheid in de slibrijke profielen van de compartimenten is ca. 1400 kg/m³. Dit betekent dat meer slib nodig is voor de vulling van de compartimenten dan waarvoor bij het ontwerp is uitgegaan. Grosso modo levert 1 m³ klei uit de Markermeerbodembodem niet meer dan ca. 1 m³ stabiel substraat voor wetlandontwikkeling.

De metingen laten in het eerste jaar een sterke toename van de bodemsterkte zien, maar verdere toename is beperkt. De sterkte van het slibrijke sediment varieert van ca. 2 kPa bovenin tot ca. 8 kPa onderin. Zandrijke profielen en de droge korst hebben een veel grotere sterkte.

Doordat 2 van de 3 deelcompartimenten grotendeels permanent onder water staan, was minder onderzoek mogelijk naar de invloed van vegetatie en korstvorming op het consolidatieproces. Op basis van de wel beschikbare metingen lijkt de invloed van vegetatie beperkt, de eerste jaren is consolidatie een dominant fysisch gedreven proces. De invloed van korstvorming is wel belangrijk, want hierdoor wordt de aandrijvende kracht voor consolidatie in de verzadigde sliblaag onder de korst vergroot door bovenbelasting en bovendien treedt in de korst door uitdroging een sterke verdichting op. Met peilbeheer is de consolidatiesnelheid dus gedeeltelijk stuurbaar, waarbij een hoog waterpeil de consolidatie vertraagt en een laag peil de consolidatie versnelt.

Qua chemische samenstelling is aangenomen dat het sediment wat toegepast in de dunslibdepots homogeen is. De variatie in chemische samenstelling wordt verklaard door zand/slib verhoudingen. Ook het poriewater vertoont direct na vulling in 2019 geen grote verschillen. Over de periode 2019 – 2021 neemt de concentratie chloride geleidelijk af en tegelijkertijd neemt de sulfaat-bicarbonaat concentratie toe. Dit worden de dominante anionen. De betrouwbaarheid van bicarbonaat wat gevormd wordt bij sterke sulfaat-sulfiet vorming is minder betrouwbaar dan waar er minder sulfaat-sulfiet gevormd wordt. Door de sulfaat-sulfiet reactie kan de berekende concentratie bicarbonaat extreem toenemen. In de

bovenste 20 cm van de sliblaag wordt het OM afgebroken door verschillende oxidanten. In deze toplaag treden diverse redoxreacties op en vormen zich redox-fronten. Nitraat geeft hier een wisselend beeld wat in niet geheel verklaard kan worden. Verder is in compartiment 1 t/m 3 mangaan gereduceerd vanaf 2 cm diepte. Hierdoor is Mn^{2+} opgelost in het poriewater. In compartiment 1 is ijzer ook vanaf 2 cm gereduceerd, in compartiment 2 en 3 is dit vanaf 5 cm diepte. Daarnaast wordt in compartiment 1 t/m 3 in de eerste 10 cm sulfaat gevormd door oxidatie van het waarschijnlijke pyriet aanwezig in het slib. Op 20 cm diepte verandert het oxiderende milieu in een reducerend milieu waarin sulfaat wordt gereduceerd en neerslaat. Waarschijnlijk is dit in de vorm van pyriet. Het oxideren van OM door sulfaat, mangaan, ijzer en in mindere mate nitraat kan leiden tot oplossing-neerslagreacties zoals beschreven voor pyriet. Deze oplossing-neerslagreacties hebben invloed op de sterkte, consolidatie en doorlatendheid van het materiaal. Hoe groot deze invloed is kan op basis van de huidige gegevens niet ingeschat worden. Als laatste kan op basis van de poriewatersamenstelling geen uitspraak worden gedaan over de geschiktheid voor vegetatie ontwikkeling. Wat wel gezegd kan worden is dat het poriewater niet verontreinigd is met zware metalen wat eventueel vegetatieontwikkeling in de weg zou kunnen staan. Verder is er op diepte een toename in fosfaat wat een positieve invloed kan hebben op eventuele vegetatieontwikkeling door nutriënten beschikbaarheid op diepte. Omdat deze beschikbaarheid op 20 cm diepte plaatsvindt zou eventuele vegetatie wortels moeten hebben van op z'n minst 20 cm om bij deze nutriënten te komen.

8 Referenties

Barciela Rial, M. (2019). Consolidation and drying of slurries: A Building with Nature study for the Marker Wadden. Proefschrift TU Delft. <https://doi.org/10.4233/uuid:ae11c3e7-86f2-4c6a-8d53-ee8781d56a72>

Myers C.R. & K.H. Nealson (1988). Microbial reduction of manganese oxides: Interactions with iron and sulfur. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Volume 52, Issue 11, November 1988, Pages 2727-2732. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90041-5)

Princen en Kalle (2022). Bouwen met slib-deelrapport ecologie. Eindrapportage 126879. Wi+Bo, Deventer.

Hanssen, J., M. Genseberger, B. Smits (2022). Slibdynamiek Marker Wadden: invloed op Markermeer. Deltares rapport 11206800-003, Delft.

Cruz, S. en T. Vijverberg (2022). Hoogteontwikkeling 'plas dras' eilanden A t/m D: Verificatie eisen, analyse processen, lessons learned en uitvoeringsaspecten. Boskalis memo DT13084-SGCR-05-GEO-M-2, Papendrecht.

Wichman, B, D. Luger, L. Sittoni, T. Vijverberg (2020). Soft mud: Field performance related to lab experiments, modelling and analysis of time-dependent processes affecting consolidation. *Terra et Aqua* Vol. 160, pp. 37 – 44.

US Army Corps of Engineers, (2015). Dredging and Dredged Material Management. Manual. https://www.publications.usace.army.mil/portals/76/publications/engineermanuals/em_1110-2-5025.pdf

Rijk, S. de et al. (2022). Syntheserapport KIMA. De eerste vijf jaar onderzoek op Marker Wadden (concept).

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