



Pilot Kleirijperij

WP 5.1 Evaluatie rijpingsmethoden
Kleirijperij

Projectomschrijving: Pilot Kleirijperij
 Contractnummer: 32268
 Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Noord Nederland
 Documentnummer: 5.1
 Datum: 27-09-2023
 Versie: v1.0
 Status: Definitief

Revisie

Revisie no.	Revisie Datum	Naam en paraaf eindverantwoordelijke			
		Opsteller	Gecontroleerd	Geautoriseerd	Paraaf
V0.1	28-12-2022	Ebi Meshkati Shahmirzadi Wouter van der Star Kees Wesdorp	Projectgroep Kleirijperij Thijs van Kessel Marcel van den Heuvel Niels Nijborg		
V0.2	11-09-2023	Ebi Meshkati Shahmirzadi Wouter van der Star Kees Wesdorp	Projectgroep Kleirijperij Thijs van Kessel Marcel van den Heuvel Niels Nijborg		
V1.0	27-09-2023	Ebi Meshkati Shahmirzadi Wouter van der Star Kees Wesdorp	Projectgroep Kleirijperij Thijs van Kessel	Niels Nijborg	

Distributielijst

Distributielijst				
Kopie nr.	Functie	Naam	Revisie	Toelichting bedrijf
	Opdrachtgever	Bart Koster		
	Opdrachtgever	Hans Ruiter		
	Opdrachtgever	Machiel Crielaard		
	Projectmanager	Niels Nijborg		
	Technisch manager	Marcel van den Heuvel		
	Kennismanager	Wouter van der Star		

Contact

Noordeinde 109b
 3341 LW Hendrik Ido Ambacht
info@ecoshape.nl
www.ecoshape.nl

Evaluatie rijpingsmethoden Kleirijperij



Evaluatie rijpingsmethoden Kleirijperij

Auteur(s)

Ebi Meshkati Shahmirzadi

Wouter van der Star

Kees Wesdorp

Evaluatie rijpingsmethoden Kleirijperij

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	
Referenties	Kleirijperij, nuttig toepassen slib
Trefwoorden	Kleirijperij, nuttig toepassen slib

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	22-09-2023
Projectnummer	11201344-000
Document ID	11201344-000-ZKS-0011
Pagina's	55
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Ebi Meshkati Shahmirzadi	
	Wouter van der Star	
	Kees Wesdorp	

Samenvatting

Bij Delfzijl is de Pilot Kleirijperij uitgevoerd als onderdeel van het programma Eems-Dollard 2050 (ED2050), waarin overheden, natuur- en milieuorganisaties en bedrijven samenwerken aan versterking van de natuur, economie en leefbaarheid. Vanuit ED2050 is er de ambitie om langdurig minimaal één miljoen ton droge stof per jaar aan het Eems-Dollardestuarium te onttrekken. De Pilot Kleirijperij is opgezet om te onderzoeken of kleirijping in slibdepots rendabel kan plaatsvinden en daarmee een bijdrage kan leveren aan de grootschalige slibonttrekking uit het Eems-Dollard estuarium. De Pilot Kleirijperij richt zich specifiek op:

1. Het ontwikkelen van kennis en (innovatieve) methoden waarmee slib in betrekkelijk korte tijd in klei van een bepaalde kwaliteit kan worden omgezet (= onderzoeksdoel);
2. Het daadwerkelijk leveren van de benodigde hoeveelheid dijkklei aan het proeftracé van het demonstratieproject Brede Groene Dijk (= productiedoel).

De pilot bestaat uit 2 locaties waar een kleirijperij is ingericht. Eén van deze locaties lag binnendijks, naast het havenkanaal van Delfzijl en werd gevuld met slib uit de slibvang van die haven. De andere kleirijperij lag buitendijks op de kwelder, enkele kilometers oostelijker. Deze kleirijperij werd gevuld met materiaal uit polder Breebaart.

Voor het onderzoeksdoel zijn deze pilots opgedeeld in proefvakken, waarin verschillende rijpingsstrategieën zijn getest. Daarvoor is steeds 1 standaard-vak gekozen, waarna variaties op dit standaard-vak zijn beschreven. De toegepaste variaties waren:

- Aanbrenghoogte (laagdikte)
- Vulslagen
- Inzaaien
- Aanwezigheid van een drainerende onderlaag
- Verzoeten met zoet water uit de omgeving
- Meer en minder bewerken

Na inbrengen van het slib begon een rijpingsperiode, waarin eerst het water werd verwijderd door bezinking en consolidatie. Het aanwezige zout verdween met het water dat door afstroming werd verwijderd. De zoutconcentratie verlaagde pas nadat door ontwatering voldoende (krimp)scheuren waren ontstaan of door omzetten voldoende kleine brokken ontstonden, dat uitwisseling met regenwater mogelijk was. In de laatste fase nam ook organische stof af.

Het geproduceerde materiaal voldeed aan de eisen gesteld in de Technische Richtlijn Klei voor dijken, met uitzondering van de gestelde eisen voor zoutgehalte en organische stofgehalte. Aanvullende proeven (de aanleg van een Proefdijk op de kwelder, en erosiebestendigheidspoeven in de Deltares Deltagoot) gaven echter wel aan dat het materiaal geschikt was voor toepassing in een dijk. De vloeigrens nam sterk af tijdens het rijpen, wat betekent dat het volume water dat moet worden verwijderd om de vereiste consistentie-index te verkrijgen hoger is, dan op basis van initiële monsters kan worden verwacht.

De aanbrenghoogte bleek het meest bepalend te zijn voor de rijpingstijd. Van de gekozen hoogtes (variërend van 40 centimeter en 2 meter bij een begindichtheid van 1,20 kg/m³) bleek het materiaal in de vakken met de lagere vulhoogtes in ruim 1 jaar, met beperkte bewerking de goede einddichtheid te krijgen. Bewerkingen bleken vooral van belang zodra het materiaal los genoeg op ruggen kon worden gezet (dichtheid circa 1,40 t/m³), en waar voldoende ruimte beschikbaar was.

Overigens is niet gezegd dat met het niet voldoen aan één of twee parameters, de klei niet kan worden toegepast: om dit te beproeven is (mede) van dit materiaal een proefdijk gemaakt (Boskalis en Van Oord 2020), en is het materiaal succesvol beproefd in op golfbelasting in de Deltagoot (van Steijn en Klein Breteler 2021).

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Doelstelling en kennisvragen	9
1.2	Opzet en inhoud rapportage	11
2	Rijpingsdoelen	13
3	Uitgevoerde werkzaamheden	15
3.1	Depotontwerp en inrichting	15
3.2	Vakindeling en Rijpingsmethodes	17
3.2.1	Overzicht van toegepaste rijpingsstrategieën in Delfzijl en Kwelder	18
3.2.2	Onbewuste variaties	20
3.2.3	Kades in Kleirijperij Delfzijl	20
3.2.4	Vullen in kleirijperij Kwelder	20
3.3	Herkomst en eigenschappen slib	20
3.3.1	Initiële variatie in parameters voor Kleirijperij Delfzijl en Kleirijperij Kwelder	22
3.4	Vullen	23
3.5	Mechanische bewerkingsmethodes	26
4	Onderzoeksresultaten	27
4.1	Algemeen verloop rijping	27
4.2	Variatie in laagdikte	27
4.3	Drainage	29
4.3.1	In de ondergrond	29
4.3.2	Via de ringkades	31
4.4	Bewerkingsfrequentie	31
4.5	Vermindering zoutgehalte tijdens vulproces	32
4.6	Vullen in 1 of 2 vulslagen	32
4.7	Biologische methode: Inzaaien van vakken	33
5	Geleerde lessen en opgedane ervaring	34
5.1	Literatuur- en voorbereidend labonderzoek	34
5.2	Bronmateriaal	35
5.3	Inrichting van kleirijperijen	36
5.4	Bewerkingsmethoden	36
5.5	Rijpingstijd	36
5.5.1	Effect ten opzichte van de eisen in de TR Klei voor Dijken	36
5.5.2	Laagdikte en drainage	37
5.6	Modellering	38
5.7	Effecten van weer en klimaat	39

5.8	Meetmethoden	39
5.8.1	Milieukundige parameters	39
5.8.2	Kleiparameters	40
5.9	Beantwoording onderzoeksvragen	41
Literatuur		43
A	Ontwerptekeningen depots	44
A.1	Ontwerp kleirijperij Delfzijl	44
A.2	Ontwerp kleirijperij Kwelder	46
B	Hoofdoverwegingen opzetten van een kleirijperij	47
B.1	Ruimte	48
B.2	Tijd	48
B.3	Omgevingsfactoren	49
B.4	Rijpingsmethodieken	50
B.5	Indicatie laagdikte voor optimale rijpingsstrategie	51
B.6	Kosten	54

1 Inleiding

De Eems-Dollard wordt gekenmerkt door een hoog slibgehalte. De toename daarvan in de afgelopen jaren heeft geleid tot een verminderde ecologische waarde. In 2015 is vastgesteld dat een grote jaarlijkse verwijdering van slib uit het systeem een positief effect zou hebben op de ecologie (Economie en Ecologie Eems-Dollard in balans 2015)¹ Deze slibwinning biedt een nieuwe materiaalstroom op het land die nuttig kan worden toegepast. Binnen het programma Eems-Dollard 2050 worden – op pilotschaal – diverse van deze methoden beproefd.

Een van deze pilotprojecten is de Pilot Kleirijperij. In deze pilot is slib in 4 jaar tijd gerijpt en omgezet in dijktenklei. De klei is vervolgens in 2022 toegepast in het Demonstratieproject Brede Groene Dijk), waarin 750 meter dijkwal is versterkt met klei uit verschillende lokaal aanwezige bronnen. De bijdrage vanuit de Kleirijperij daarvoor is 70 000 m³. De resterende klei uit de Kleirijperij (23 000 m³) is onder andere gebruikt als ophoogmateriaal.

De pilot is uitgevoerd met twee slibbronnen uit de Eems-Dollard: baggerspecie uit het Zeehavenkanaal in Delfzijl en recente slibafzettingen uit de polder Breebaart. Het slib uit elk van deze bronnen is verwerkt op een aparte locatie: de Kleirijperij Delfzijl (voor het slib uit het Zeehavenkanaal) ligt binnendijs direct naast het Zeehavenkanaal, terwijl de Kleirijperij Kwelder (voor het slib uit polder Breebaart) buitendijs ligt op de kwelder, direct voor de dijk waarin het materiaal wordt toegepast voor de Brede Groene Dijk. Het slib van beide bronnen is marien slib met een hoog zout- en organische stofgehalte. De locaties van beide slibbronnen en kleirijperijen grenzen aan het Eems-Dollard estuarium in de provincie Groningen weergegeven in Figuur 1. De aanpak is beschreven in het Plan van Aanpak (EcoShape 2017a).

De Pilot Kleirijperij wordt uitgevoerd door Provincie Groningen, stichting het Groninger Landschap, Groningen Seaports, Rijkswaterstaat Noord-Nederland, Waterschap Hunze en Aa's en Stichting EcoShape.



Figuur 1: Locatie van de Kleirijperijen Delfzijl (rood) en Kwelder (groen) in Nederland.

¹ Op pagina 14 van deze rapportage wordt een minimumhoeveelheid van orde-grootte 1 miljoen ton (droge stof) per jaar geïntroduceerd: "Uit het rapport van spoor 1 kan worden afgeleid dat de vereiste orde-grootte van de slibonttrekkingen tenminste 1 miljoen ton (als droge stof) per jaar bedraagt."



Figuur 2: Kleirijperij Delfzijl (links) met de locatie van herkomst van het slib, haven Delfzijl (rechts) (Meshkati, Wesdorp, et al. 2023a).



Figuur 3: Kleirijperij Kwelder (links) met de locatie van herkomst van het slib, polder Breebaart (rechts) (Meshkati, Wesdorp, et al. 2023b).

1.1 Doelstelling en kennisvragen

Het doel van het proefproject voor kleirijping (de pilot "Kleirijperij") is het bestuderen van methoden om gebaggerd slib om te zetten in klei die geschikt is voor de bouw van dijken, en in de praktijk te beproeven wat de meest efficiënte en effectieve methode is om dat te doen. De doelstelling is in het Plan van Aanpak als volgt geformuleerd:

"De doelstelling van de Pilot Kleirijperij is het nagaan met welke innovatieve methoden slib op het land nuttig en rendabel is om te zetten in klei, waardoor een economische basis kan worden gelegd onder de gewenste slibonttrekking van de Eems-Dollard. Tegelijkertijd wordt hiermee bijgedragen aan een innovatieve aanpak van dijkversterking. De spin-off kan (inter)nationaal toepasbaar zijn. "

In het kader van de pilot werden gedurende 4 jaar een reeks fysische en chemische kenmerken gemeten en werd de geschiktheid van het kleiproduct voor de dijkenbouw beoordeeld. Naast de onderzoeksdoelstelling is het doel om 70 000 m³ geschikte dijkklei te produceren. Dat betekent dat bij de keuze van uitvoering - en ook mogelijke maatregelen tijdens het proces - zowel de onderzoeksdoelen als deze productiedoelstelling moeten worden meegenomen.

In het Plan van Aanpak (EcoShape 2017a) is ten behoeve van de onderzoeksdoelen een aantal kennisvragen gedefinieerd dat is afgeleid van de bovengenoemde doelstelling.

De hoofdvraag van het onderzoek is:

- *Wat zijn de effecten en karakteristieken van kansrijke kleirijpingsmethodes met slib uit de Eems-Dollard?*

De bedoelde karakteristieken liggen op het gebied van de uit te voeren handelingen, gebruikte materialen, benodigde rijpingstijd, kosten, waarde voor de ecologie en impact op het milieu.

Met effecten wordt bedoeld op het te bereiken resultaat: de karakteristieken van de geproduceerde materialen, en de mate van slibreductie die in de Eems Dollard gerealiseerd kan worden. De effecten worden niet uitgewerkt op de schaal van de Eems-Dollard, omdat dit onderzoek zich richt op het rijpen van klei, en niet op het terugdringen van vertroebeling.

De belangrijkste *afgeleide* kennisvragen bij deze hoofdvraag zijn voor de geselecteerde rijpingsmethodes:

a) Hoe verloopt de rijping (wat zijn de fysische eigenschappen en watergehalte)?

Rijping van klei heeft zowel fysische (ontwatering), chemische en biologische aspecten. Het verlagen van het watergehalte is één van de belangrijkste opgave bij de rijping en daarom is het watergehalte (en de daaraan gerelateerde benodigde hoogte van het rijpingsdepot²) een belangrijke parameter. De sterkte-ontwikkeling wordt tevens gevolgd om vast te stellen of en wanneer de klei aan de eisen voldoet. Via vaststelling door monitoring en vergelijking van deze parameters voor verschillende technieken wordt belangrijke kennis ontwikkeld rondom bewerkingsmethodieken, hun karakteristieken en hun effecten.

b) Wat is de ontwikkeling van het zoutgehalte?

Het zoute slib dat op het land wordt gebracht zal geleidelijk verzoeten. Dat is van belang omdat klei met een te hoog zoutgehalte (>4 g/l NaCl in het poriewater) niet voldoet als erosiebestendige klei volgens de technische richtlijn "Klei voor dijken" (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen 1996).

c) Wat is de ontwikkeling van de natuurwaarde?

De kleirijperij kan waarde hebben als (tijdelijke) natuur. Monitoring is er op gericht om dat gedurende de rijpingsfase op verschillende momenten vast te stellen.

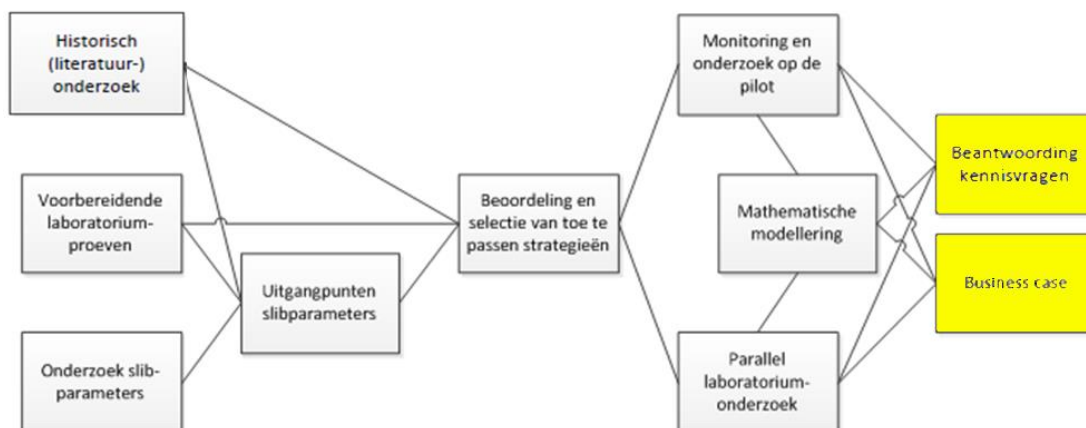
d) Wat zijn de voorwaarden voor een sluitende business case?

In de business case komen de belangrijke vragen bij elkaar: wat zijn de kosten en baten van een kleirijperij, waarbij aan de opbrengstenkant niet alleen wordt gekeken naar de opbrengst wat betreft waarde van het geproduceerde materiaal, maar ook naar ecologische waarde (die niet "op kosten" wordt gezet) en de kwantificering van de mate waarin de doelen van verwijdering van 1 miljoen ton droge stof slib per jaar worden gehaald. Onderdeel van de business case is ook een inventarisatie van juridische randvoorwaarden.

² Ten opzicht van het maaiveld.

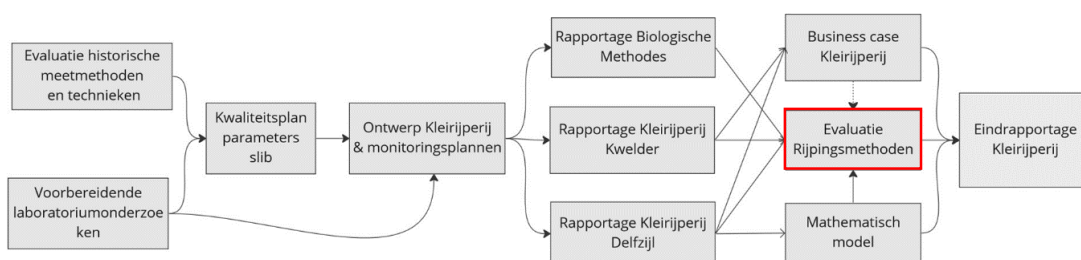
1.2 Opzet en inhoud rapportage

Een overzicht hoe het huidige rapport past binnen de overige kleirijperij-activiteiten is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Relatie tussen verschillende onderzoeksactiviteiten Kleirijperij (Plan van Aanpak, 2017).

Dit rapport gebruikt de leerpunten uit de monitoring van de Kleirijperijen op de Kwelder (Meshkati, Wesdorp, et al. 2023b) en bij Delfzijl (Meshkati, Wesdorp, et al. 2023a), in combinatie met de mathematische modellering (Meshkati, Dupuits en van Kessel 2021) om de verschillende rijpingsmethodes te evalueren. Het startpunt daarvoor was het literatuuronderzoek naar bestaande rijpingsmethodes (Sjenitzer, et al. 2020), waarbij met name is gekeken naar de kennis van grootschalige projecten uit de vorige eeuw (zoals de “Euroklei” gebruikt als kernmateriaal in dijken in Streefkerk, de afsluitdijk bij Lauwersoog) en naar bestaande rijpingsmethodes. Vervolgens is met materiaal uit polder Breebaart en de haven van Delfzijl onderzoek gedaan naar consolidatie en rijpingsgedrag op laboratoriumschaal (Meshkati, Wichman en Hanssen 2018). De relatie tussen de verschillende rapporten is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5: Relatie tussen verschillende rapportages, die onderdeel uitmaken van de Pilot Kleirijperij.

Het rapport dient zelf weer als input voor de Eindrapportage Kleirijperij (de Vries en de Reus 2023).

Het rapport is als volgt opgebouwd:

- In hoofdstuk 2 zijn de rijpingsdoelen beschreven. Deze vormen de basis voor de verdere analyse en worden ingegeven door contractuele verplichtingen.
- In hoofdstuk 3 zijn de uitgevoerde werkzaamheden, en de onderzoeksopzet (waarbij verschillende methodes in verschillende vakken zijn weergegeven).
- In hoofdstuk 4 zijn de onderzoeksresultaten beschreven, waarbij het algemene verloop van de rijping, en de effecten van verschillende methodes is toegelicht.
- Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van leerpunten en de beantwoording van de kennisvragen. Daarbij worden de literatuurstudie vooraf, en de resultaten van de pilot gekoppeld aan de inzet van een mathematisch model om ook onder andere omstandigheden tot een goede inschatting van rijpingstijd te komen. Het hoofdstuk eindigt met de beantwoording van de onderzoeksvragen.

2 Rijpingsdoelen

Het doel van de rijping van het slib is om klei te maken die geschikt is voor het maken of versterken van een dijk. De eisen daarvoor liggen in Nederland niet vast: de geotechnische eisen van het materiaal zijn immers onderdeel van het ontwerpproces waarin het keringsontwerp als geheel aan de gestelde eisen moet voldoen.

Bij de toepassing van klei in Nederland wordt echter vaak gebruik gemaakt van klei die voldoet aan de voorwaarden gesteld in de Technische Richtlijn “Klei voor Dijken”. Klei die voldoet aan deze eisen is in het algemeen geschikt voor dijken en heeft de erosiebestendigheid en het zoutgehalte, dat van klei voor die toepassing kan worden verwacht. Daarmee is echter niet gesteld dat klei die niet aan deze eisen voldoet automatisch “ongeschikt” is voor toepassing. Daarvoor zijn twee hoofdredenen aan te voeren:

- De parameters waarnaar in het rapport klei voor dijken wordt verwezen zijn *indirecte* parameters (zoals zoutgehalte en plasticiteitsindex), die als indicator moeten dienen om te beoordelen of de klei zijn functie kan vervullen (zoals erosiebestendigheid). Het kan echter zijn dat ondanks dat niet aan deze parameters wordt voldaan, tóch aan de functionele eisen van de klei wordt voldaan.
- Klei die niet voldoet aan de gestelde eisen en van mindere kwaliteit is, kan nog steeds een functioneel doel dienen in de waterkering indien daar in het ontwerp voldoende rekening mee wordt gehouden: zo kan een mindere erosiebestendige klei in een dikkere laag worden aangebracht. Ook kan het zijn dat de mindere kwaliteit (bijvoorbeeld indien de klei krimpgevoeliger is) leidt tot verhoogde of andere onderhoudsbehoefte, maar ook dat wil niet zeggen dat de klei niet toepasbaar is.

Bij het ontwerp van de Pilot Kleirijperij is rekening gehouden met de eisen in de Technische Richtlijn “Klei voor Dijken”. Deze zijn weergegeven in Tabel 1.

Bij de monitoring van de pilot is gekeken naar die parameters waarvan wordt aangenomen dat ze veranderen als gevolg van het rijpingsproces, en is steeds gekeken in welke mate ze voldoen aan de eisen.

Tabel 1: Vereiste waarden voor de klei om in dijken te mogen toepassen voor de Kleirijperij, gebaseerd op Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (1996).

Parameter	Vereiste waarde	Verandering tijdens rijpingsproces verwacht?
Zoutgehalte in porievocht	< 4 g/L	Ja
Organische stofgehalte	< 5 % droge stof	Ja
Erosiebestendigheid		
- Erosieklasse	- erosieklasse 1 ⁴	-Nee
- plasticiteitsindex	>0,73*(vloegrens-20%)	-Ja
- vloegrens	-	-Ja
- uitroegrens	-	-Ja (beperkt)
Consistentie-index	>0,6	Ja ⁵
Zandgehalte	<40%	Nee
Kalkgehalte	<25%	Ja
Dichtheid ³	>1,55-1,65 t/m ³	Ja
Milieukundige kwaliteit ^{#1}	Klasse A, Achtergrondwaarde of Bodemfunctieklaas Wonen	Nee ^{#2}

^{#1} Geen eis uit de rapportage “Klei voor dijken”, maar een milieukundige eis gebaseerd op toepassing van besluit bodemkwaliteit op rijpings- en toepassingslocatie.

^{#2} Hoewel geen milieukundige klassenverandering wordt verwacht, kunnen wijzigingen optreden in de (gestandaardiseerde) gehalten van individuele parameters, mede omdat de gestandaardiseerde gehalten afhankelijk zijn van het organische stofgehalte (met de gloeiverliesmethode).

De eisen voor de toepassing bleken gedurende het project en met de hoeveelheid die moest worden geproduceerd niet haalbaar. Daarom is gekeken of de klei aan de functionele eisen (zoals erodeerbaarheid) kon voldoen, ondanks verhoogde organische stof- en zoutgehalten. Daarvoor is in Onderzoek Geschiktheid Deltaklei (OGD) Kleirijperij-klei en andere klei die niet formeel voldoet aan de eisen- getest, én is gekeken of met de (op dat moment nog maar beperkt gerijpte) klei van de kleirijperij een proefdijk viel aan te leggen (testen van verwerkbaarheid) (Boskalis en Van Oord 2020). Op basis van de resultaten van deze proeven is besloten de eisen voor zout en organische stofgehalte te laten vallen.

³ De dichtheid is niet een formele eis, maar indien de consistentie-index-eis wordt gehaald, zal de dichtheid rond de 1,55-1,65 t/m³ liggen. Hoe dichtheidsmetingen het best kunnen worden gebruikt, wordt ook besproken in paragraaf 5.8.

⁴ Erosieklasse 2 is voor de toepassing in de Brede Groene Dijk ook acceptabel, maar op basis van het ingangsmateriaal is dat niet te verwachten. Voor erosieklasse 2 geldt een minimum plasticiteitsindex van 18%.

⁵ Tijdens bewerken zal wellicht enige doormenging met de zandbodem en zandige ringdijken optreden, waarmee het zandgehalte toch enigszins kan toenemen.

3 Uitgevoerde werkzaamheden

3.1 Depotontwerp en inrichting

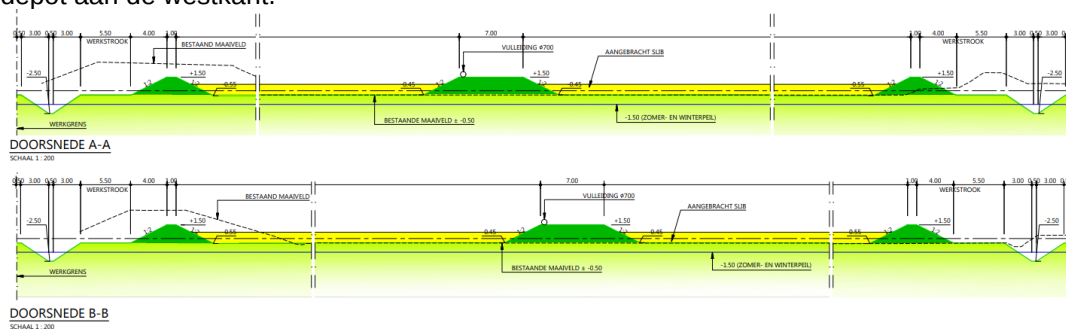
Op basis van de onderzoeksvragen, gedefinieerd in het Plan van Aanpak, is een literatuurstudie, inclusief de analyse van historische methoden (Sjenitzer, et al. 2020), uitgevoerd om verschillende technieken in kaart te brengen die tijdens de pilot getest konden worden. De technieken zijn zo gekozen, dat ze ook op grote schaal kosteneffectief zijn toe te passen. In dit hoofdstuk wordt eerst het algemene depotontwerp beschreven, en vervolgens de indeling in proefvakken voor het testen van verschillende strategieën.

Kleirijperij Delfzijl ligt binnendijs, in de nabijheid van het Zeehavenkanaal waar de baggerlocatie zicht bevindt. Het was voorheen een gronddepot van Groningen Seaports. Tussen het depot en baggerlocatie liggen achtereenvolgens een polder(kwel)sloot, de Valgenweg en de zeedijk (Figuur 6).



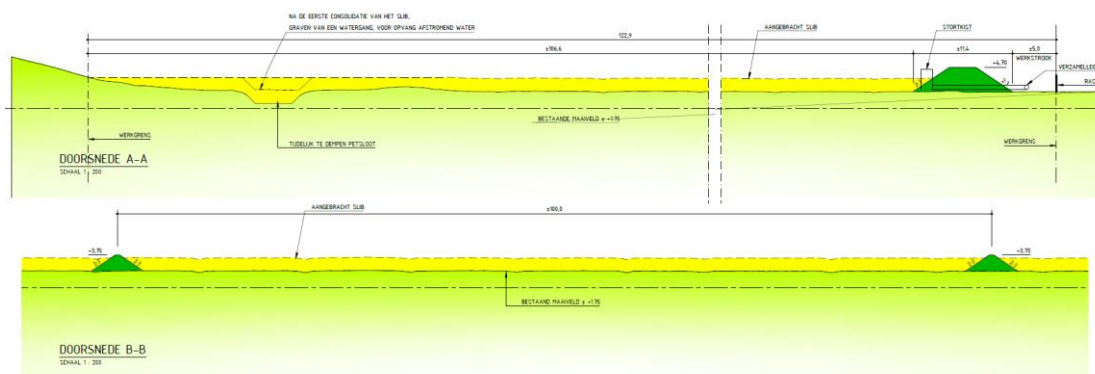
Figuur 6: Ligging van de kleirijperij en waterlichamen in de omgeving.

Het depot is aangelegd zoals is weergegeven in Figuur 2 en heeft een oppervlakte van circa 16 hectare. Om het depot heen is een ringsloot gegraven. De klei die hierbij vrijkwam is gebruikt om de buitenste ringperskade te bouwen. Van buiten naar binnen bestaat het terrein uit een ringsloot voor de afwatering, een ringperskade, de lager gelegen vlakke proefvakken en een brede middendijk. Zie Figuur 7 voor de dwarsdoorsneden van het depot. De vulleidingen, waarmee de proefvakken zijn gevuld, liggen aan de binnenkant van de proefvakken op de middendijk. De stortkisten waarmee kon worden afgewaterd liggen aan de buitenkant van de proefvakken en komen uit in de ringsloot. Het overtollige water van de proefvakken is van daaruit terug naar zee gepompt via een retourleiding. De proefvakken konden worden bereikt met zwaarder materieel vanaf de middendijk via de ingang van het depot aan de westkant.



Figuur 7: Twee dwarsdoorsneden van het depot Kleirijperij Delfzijl (EcoShape 2017b). De ontwerptekening is opgenomen als Bijlage A.

In oktober 2018 is het depot gebouwd en zijn de perskades aangelegd. De perskades van de proefvakken zijn gemaakt van klei afkomstig van de kwelder dat vrijkwam bij het graven van een Klutenplas (een uitgegraven plas direct ten noorden van de pilotlocatie en onderdeel van het project). De persleidingen waarmee het slib in de vakken is gespoten liggen aan de zuidkant (dijkkant) van de proefvakken. Hierbij kwam de uitstroomopening van de persleiding tot ongeveer 6 meter in het vak. Bij de Kwelderlocatie is geen ringsloot gegraven, de afwatering verliep via de stortkisten aan de noordzijde van de vakken. Deze waren met een leiding aan elkaar verbonden en mondden uit in één afvoerleiding.



16 van 55

3.2 Vakindeling en Rijpingsmethodes

Bij de kleirijperij is steeds één standaard uitvoeringsvak ingericht en in andere vakken steeds één parameter is gevarieerd. In kleirijperij Delfzijl is vak D9 de referentie en in kleirijperij Kwelder vak K3 (zie Figuur 9 in paragraaf 3.2.1 voor vakindeling).

Een overzicht van deze standaardvakken is weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2: Beschrijving van de standaardvakken.

	Kleirijperij Delfzijl	Kleirijperij Kwelder
Vak	D9	K3
Oppervlakte	1 ha	0,8 ha
Drainage d.m.v. zand en drainagebuizen	Ja	Nee
Bewerkingsfrequentie	Normaal	Normaal
Vulhoogte [m]	1,9	1
Aantal vulslagen	2	>4
Planten van vegetatie	Nee	Nee
Mengen met zoetwater?	Nee	Nee

In vak D9 zijn ook analyses gedaan om de variantie in de metingen te analyseren. In de praktijk van de uitvoering speelden echter ook variaties waarop geen invloed was, en speelden prioriteiten in de uitvoering een rol (zoals het doel om voldoende klei te produceren voor levering aan het Demonstratieproject Brede Groene Dijk). Daarmee was het niet altijd mogelijk om één variabele tegelijkertijd te variëren. In de analyse is daarom steeds gekeken naar een selectie van vakken die een gelijk type behandeling hebben gehad. Daarnaast is gekeken naar de variatie van specifieke parameters over de gehele kleirijperij.

De gevarieerde parameters worden hieronder weergegeven, waarbij ook kort de redenen voor de keuze van deze variaties is weergegeven.⁶

- Variatie in laagdikte
 - Van laagdikte is bekend dat het een bepalende factor is bij rijping van slib. Vuistregel daarbij is dat een verdubbeling van de laagdikte leidt tot een verviervoudiging van de consolidatietijd (en het is juist de consolidatietijd die maatgevend lijkt voor rijping). Variatie is verder aangebracht in de initiële laagdikte door op te werken met 1 of met 2 vulslagen, die enkele maanden uit elkaar lagen.
- Variatie in bewerkingsfrequentie
 - Bewerkingen kunnen verschillende functies hebben tijdens de kleirijperij en zijn gericht op het inbrengen van zuurstof of het verbeteren van waterafvoer en de hypothese is dat meer bewerkingen leiden tot het sneller gereed maken van de klei.
- Wel of geen drainage?
 - Drainage in de onderlaag is gerealiseerd door aanleggen van een zandlaag met daarin horizontale drains. Daarmee kan ook water via de onderkant van het slibpakket worden afgevoerd. Naast deze “bewust” aangebrachte variatie is ook een verschil in drainage door de kades aan de zijkant waargenomen als gevolg van de grondslag van de kades (klei of zand).
- Wel of niet onderwater laten staan van vakken na vullen

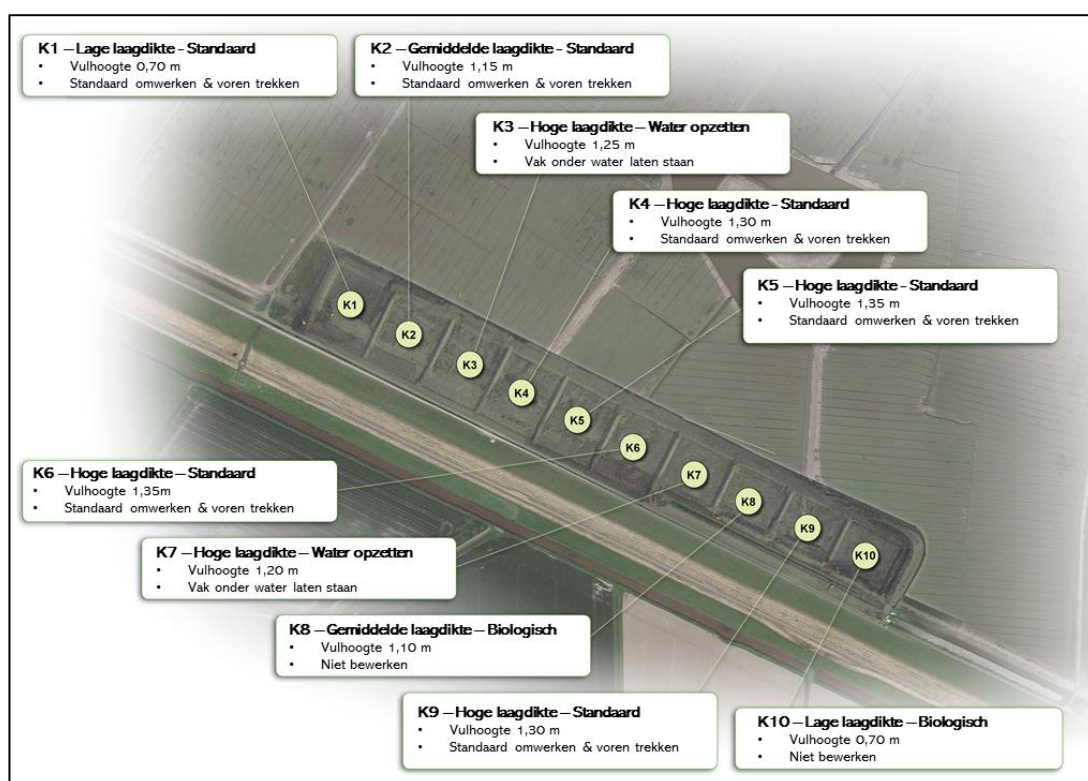
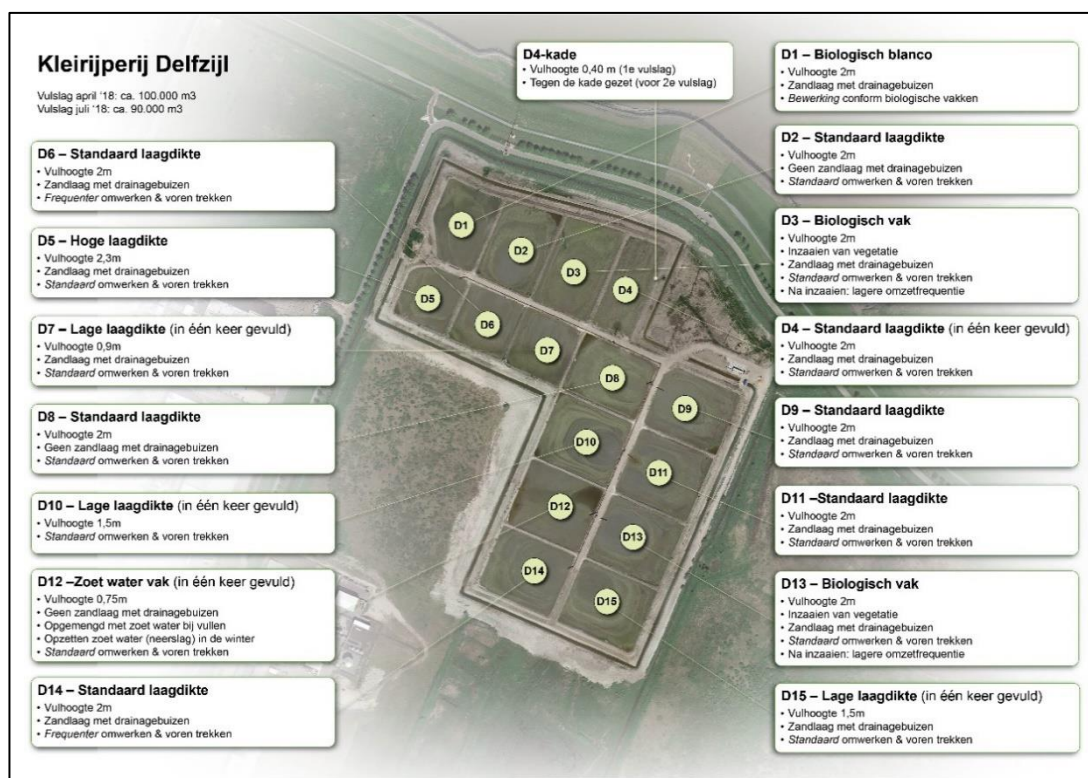
⁶ Meer detail over de uitwerking van deze variatie is te vinden in hoofdstuk 2 van de monitoringsrapportages voor kleirijperijen Delfzijl (Meshkati, Wesdorp, et al. 2023a) en Kwelder (Meshkati, Wesdorp, et al. 2023b).

- Vermindering van het zoutgehalte is een van de doelen om de klei geschikt te maken. Door direct te mengen met zoet water kan daarmee al vóór de start van het rijpen een daadwerkelijk begin gemaakt worden. Dat is getest door in één vak voor het vullen al zoet water in te brengen.
- Biologische methoden:
 - De voordelen van vegetatie liggen in de sterkte van de grond, de ontwatering, zuurstofdoordringing en structuurvorming. Mogelijke nadelen liggen in “harde” wortelstructuren die de klei minder homogeen maken. Op basis van deze overwegingen is een tweetal zaadmengsels gekozen waarvan de verwachting was dat ze goed zouden opkomen op het type slib. Daarbij is ieder vak ingedeeld in 3 stroken, i) ingezaaid met zulte, ii) ingezaaid met een zaadmengsel van zulte en strandmelde en iii) niet ingezaaid.

3.2.1 Overzicht van toegepaste rijpingsstrategieën in Delfzijl en Kwelder

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van hoe de bovenstaande parameters zijn gevarieerd over de proefvakken.

Kleirijperij Kwelder bestaat uit minder vakken, waardoor er minder variaties zijn aangebracht. Bovendien is om ecologische redenen daar geen drainerende zandlaag met drainageleidingen aangelegd, zoals dat wel is gedaan in 12 van de 15 vakken van Kleirijperij Delfzijl.



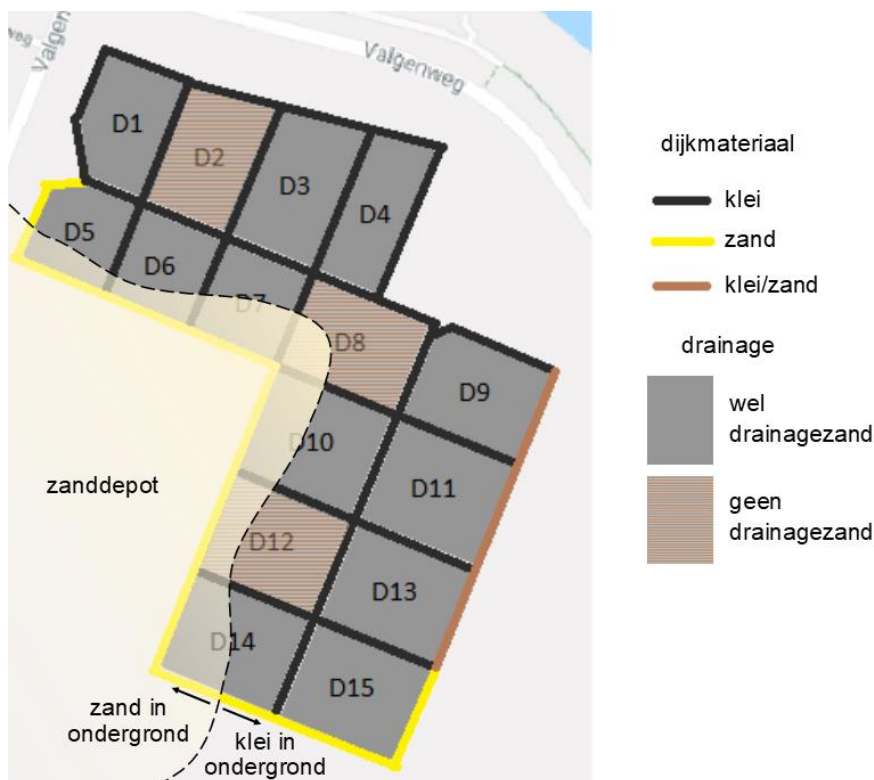
Figuur 9: Overzicht van gevarieerde parameters in de proefvakken in de kleirijperijen Delfzijl (boven) en Kwelder (onder).

3.2.2 Onbewuste variaties

Een aantal onbewuste variaties heeft een effect gehad op de rijping en is daarom ook van belang voor de interpretatie. Ze worden hieronder besproken.

3.2.3 Kades in Kleirijperij Delfzijl

Naast de bewust gekozen rijpingsstrategieën heeft ook de ondergrond en depotopbouw een effect gehad op de resultaten. Zo is de drainerende werking van de ondergrond, en van de aangelegde kades niet overal gelijk in Delfzijl. Voor de kleirijperij op de kwelder is dat echter wel het geval. In onderstaande figuur is het verschil in dijkmateriaal en ondergrond weergegeven.



Figuur 10: Dijkmateriaal, drainage, en (indicatie van ondergrondtype) in kleirijperij Delfzijl.

3.2.4 Vullen in kleirijperij Kwelder

De aard van het materiaal en de vulmethode maakt dat de homogeniteit bij de Kleirijperij Kwelder sterk varieert. De effecten daarvan zijn verder besproken in paragraaf 3.4.

3.3 Herkomst en eigenschappen slib

Voor het vullen van de depots van de twee pilotlocaties Delfzijl en Kwelder is gebruik gemaakt van slib afkomstig uit twee verschillende locaties in het Eems-Dollard estuarium.

Kleirijperij Delfzijl is gevuld met slib verkregen uit de slibvang van het nabijgelegen Zeehavenkanaal Delfzijl op 11-14 m -NAP met behulp van een sleeophopperzuiger. Het Kleirijperij depot, verdeeld in 15 compartimenten (proefvakken), is in twee keer gevuld. Het vullen van het depot is uitgevoerd met een sleeophopperzuiger, die net ten noorden van de kleirijperij in het Zeehavenkanaal via een drijvende leiding aansluiting had op de leidingen naar de kleirijperij. Enkele proefvakken zijn in één keer geheel gevuld tijdens de eerste vulslag, in april 2018, en de overige vakken zijn toen tot halverwege gevuld zoals ook beschreven staat in het vulplan (EcoShape 2018a). Om te zorgen dat gedeeltelijke bezinking van het slib kon plaatsvinden zijn de halfgeevulde vakken pas drie maanden later verder gevuld tijdens de tweede vulslag in juli 2018.

In totaal is er in het depot een volume van 198.000 m³ (gemeten in het beun), dichtheid +- 1,2 ton/m³) aan baggermateriaal verdeeld over de 15 proefvakken, zodat er zo'n 65 000 TDS (ton droge stof) aan slibdeeltjes beschikbaar was om te laten rijpen tot klei.

Kleirijperij Kwelder is gevuld met slib afkomstig uit een andere locatie in het estuarium. Het slib van de Kwelderlocatie komt uit de Polder Breebaart. Dit gebied van het Groninger Landschap staat door middel van een duiker in verbinding met het estuarium waardoor er sprake is van gedempt getij. De polder was dichtgeslibd en is door baggerwerkzaamheden in 2019-2020⁷ weer op de gewenste diepte gebracht met behulp van een cutterzuiger. Het materiaal van deze baggerwerkzaamheden is via leidingen naar Kleirijperij Kwelder gebracht en daar verdeeld over 10 proefvakken. Toelevering van slib naar de Kleirijperij Kwelder heeft in een periode van ongeveer 16 weken plaatsgevonden, van november 2019 tot maart 2020.

Ook bij deze pilotlocatie was een wachttijd tussen de vulslagen wenselijk om het slib gedeeltelijk te laten bezinken. Dit is gerealiseerd door de vulperiode zo in te delen dat eerst alle vakken voor de helft zijn gevuld voordat ze verder werden gevuld tot hun eindhoogte. Dit zorgde ervoor dat er een wachttijd van minimaal 3 tot maximaal 10 weken was voordat alle vakken tot hun eindhoogte waren gevuld.

In totaal is er bij de Kleirijperij Kwelder locatie zo'n 62 000 m³ (ca 28 000 TDS) aan baggerspecie ingebracht (gemeten na enkele weken; toen de dichtheid 1,22 ton/m³ bedroeg).

In onderstaande tabel zijn de belangrijkste verschillen en overeenkomsten tussen beide kleirijperijen schematisch weergegeven.

Tabel 3: Overeenkomsten en verschillen van beide kleirijperijen.

	Kleirijperij Delfzijl	Kleirijperij Kwelder
Initiële dichtheid	1,2 t/m ³	<1,05 t/m ³
Drainage in de bodem	Meestal wel	niet
Volume initieel	198 000 m ³	62 000 m ³ (na enkele weken in situ)
Zandgehalte	<1%	16%
Segregatie	Nee	Ja
Aantal vakken	15	10
Samenstelling kades	Zand of Klei	Klei
Bronlocatie	Eems-Dollard (Zeehavenkanaal Delfzijl)	Eems-Dollard (polder Breebaart)

⁷ Ook in de winter 2018-2019 is met een kleine hoeveelheid slib gevuld. Die hoeveelheid is echter zo klein, dat dit niet is meegenomen bij de evaluatie.

3.3.1

Initiële variatie in parameters voor Kleirijperij Delfzijl en Kleirijperij Kwelder

Voor de vakken is ervoor gekozen om de initiële slibparameters (zoals dichtheid en zandgehalte) niet te variëren. Zo wordt een homogeen ingangsmateriaal verkregen en kunnen verschillen die gezien worden zoveel mogelijk worden toegeschreven aan bewust aangebrachte veranderingen (zoals laagdikte). Bij de grote hoeveelheden slib die werden ingenomen is er uiteraard sprake van enige variatie.

Hieronder de tabellen met initiële parameters uit het rapport “Kwaliteitsplan Parameters Slib”. Deze tabellen geven weer dat de spreiding van parameters van het slib uit Polder Breebaart veel hoger ligt dan uit de Haven van Delfzijl. Vooral zandfractie is een belangrijke parameter; in Delfzijl zit nauwelijks zand in het slib (1%), terwijl het slib uit Polder Breebaart een veel hoger en fluctuerend percentage voor de zandfractie geeft (Van den Heuvel 2018).

Tabel 4: Initiële parameter(ranges) in het vooronderzoek uit de haven van Delfzijl.

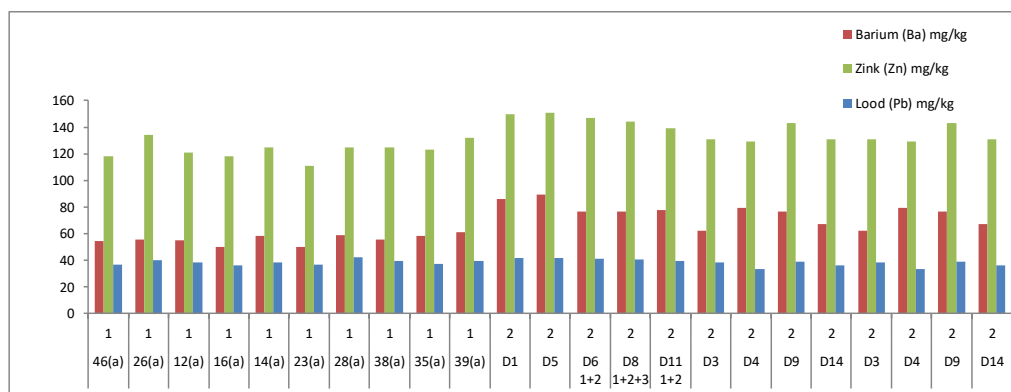
Parameter		Eenheid	Minimum	Maximum	Gemiddeld *)
Lutumgehalte	(% <2 µm)	[%]	38,7	44,4	41
Zandgehalte	(% >63 µm)	[%]	0,5	1,7	1
Atterbergse grenzen	Uitrolgrens	[%]	51	57	55
	Vloeigrens	[%]	136	183	150
	Plasticiteitsindex	[%]	80	126	95
Dichtheid (situ)		[t/m³]	1,17	1,27	1,22
Organische stofgehalte		[%]	4,5	11,4	8,7

Tabel 5: Initiële parameter(ranges) in het vooronderzoek uit polder Breebaart.

Parameter		Eenheid	Minimum	Maximum	Gemiddeld *)
Lutumgehalte	(% <2 µm)	[%]	27	53	37
Zandgehalte	(% >63 µm)	[%]	4	30	13
Atterbergse grenzen	Uitrolgrens	[%]	28	53	40
	Vloeigrens	[%]	68	151	97
	Plasticiteitsindex	[%]	40	98	57
Dichtheid (situ)		[t/m³]	1,20	1,60	1,36
Organische stofgehalte		[%]	4,2	10,4	7,7

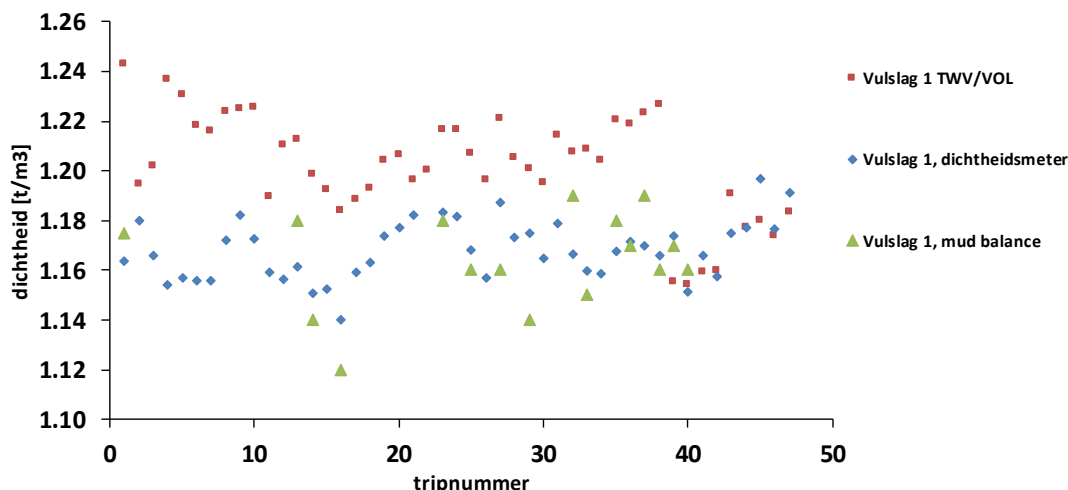
*) gemiddelde over meerdere waarden in de relevante vakken/locaties

De slibsamenvorming bij Kleirijperij Delfzijl is echter zeer homogeen te noemen. Dit wordt geïllustreerd door de samenstelling aan zware metalen zeer beperkt varieert voor de genomen metingen (zie Figuur 11). Als de fysische of milieukundige/chemische samenstelling sterk had gevarieerd, dan waren de variaties veel groter geweest.



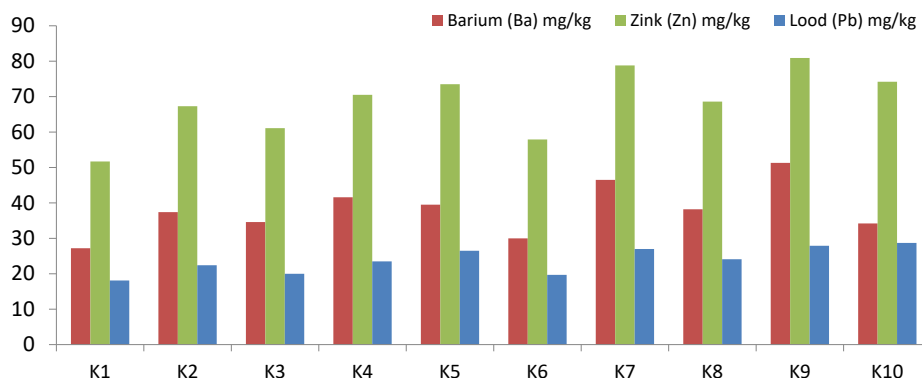
Figuur 11: Geselecteerde zware metalen als indicator voor de variatie van het slib tijdens het vullen van kleirijperij Delfzijl.

Wat iets meer varieert is de dichtheid. Dat betekent ook dat ook de hoeveelheid zeewater en daarmee het zoutgehalte varieert. Ook de variaties in dichtheid zijn echter als minimaal te classificeren.



Figuur 12: De dichtheid is bepaald via scheepsinstrumentatie (de nucleaire dichtheidsmeter; en de verhouding tussen massa en volumeverandering bij het lossen (TWV/VOL). Tevens zijn handmatig in de vakken metingen gedaan met behulp van een "mud balance".

Op de kleirijperij kwelder was sprake van een duidelijk minder homogene bron (zie Figuur 13): de polder Breebaart was in de loop der jaren dichtgeslibd, en bij de werkzaamheden werd zowel het recentere afgezette slib als de dieper gelegen bodem meegenomen.



Figuur 13: Geselecteerde zware metalen als indicator voor de variatie van het slib na het vullen op kleirijperij Kwelder.

3.4 Vullen

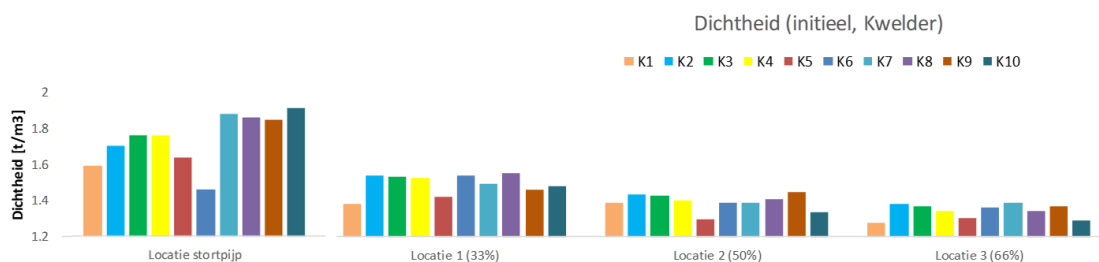
Bij het vullen is bij beide kleirijperijen via een stortpijp materiaal in de verschillende proefvakken gebracht. Wel zijn er grote verschillen in dichtheid en daarmee ook in het gedrag van het materiaal.

Bij het transport van slib en tijdens het uitstromen kan segregatie optreden: de scheiding tussen grotere en kleine deeltjes. Of en in welke mate dat optreedt, is sterk afhankelijk van het type materiaal en de dichtheid waarmee het verpompt werd. Daarbij werden grote verschillen gezien tussen de beide kleirijperijen.

Het slib in Delfzijl is gebaggerd in de slibvang: een 7 meter dikke laag slib net na de ingang van de Haven van Delfzijl. Het slib is hier gebaggerd door de sleepkop in het slib te steken waardoor het situ materiaal onverdund is gebaggerd. Het slib is vervolgens met deze situ dichtheid ($1,18 - 1,20 \text{ t/m}^3$) in de Kleirijperij Delfzijl gepompt. Aangezien de situ dichtheid hoger is dan de bezinkingsdichtheid ($1,16 \text{ t/m}^3$) heeft er geen bezinking plaatsgevonden en was er ook geen ruimte voor ontmenging tijdens het inbrengen. Door de snelheid van het inbrengen (enkele dagen) was er ook nog geen consolidatie van de diepere lagen opgetreden, waardoor er ook in verticale zin nagenoeg geen variatie was. Bovendien zat er nauwelijks zand (1% volgens de waterbodemonderzoeken vooraf, 7% bij de eerste analyses) in het slib, en had het slib een uniforme korrelverdeling waardoor ontmenging ook minder evident was.

Bij de Kleirijperij Kwelder was dat anders. Door de grotere transportafstand en door de wijze van baggeren (cutterzuiger) werd er veel proceswater gebruikt om het slib te verpompen over de ruim 8 km. Hierdoor was de dichtheid van het mengsel ($<1,05 \text{ t/m}^3$)⁸ veel lager dan de bezinkingsdichtheid waardoor er wel bezinking en ontmenging plaatsvond in de depotvakken. Bovendien zat er veel meer zand in het slib, dat ruim de gelegenheid kreeg om op korte afstand van de uitstroomopening van de persleiding te bezinken, wat goed te zien was in de dichtheid na 4 maanden (Figuur 14).

Er ontstonden ook afwisselende klei- en zandlagen in de depots, door het wisselen van het vullen in de verschillende vakken en door de heterogeniteit in het baggergebied van Polder Breebaart. Later bij het ontgraven kwam er overspannen water uit het depot uit zandlagen die door kleilagen waren afgesloten.



Figuur 14: Dichtheidsverloop na vullen op kleirijperij Kwelder bij de stortpijp en in 1 raai op 1/3^e, 1/2^e en 2/3^e van de totale lengte van het depot na 4 maanden.

Ook verschillen over de laagdikte waren goed waarneembaar, zoals bijvoorbeeld te zien is in Figuur 15 afkomstig uit vak K2:

⁸ De dichtheid uit de pijp was erg laag, vanwege de gekozen baggermethode. Tijdens de inmetingen was de dichtheid al sterk gestegen .



Figuur 15: Afwisseling van zand en klei over de lengte op circa 30 meter van de stortpijp in vak K2.

3.5 Mechanische bewerkingsmethodes

Tijdens het rijpen waren steeds wisselende methodes nodig om te komen tot een zo goed mogelijke waterafvoer en rijping. Dit werd veroorzaakt doordat de begaanbaarheid met geschikt materieel sterk veranderde naarmate de rijping vorderde. Zo kon in het begin alleen met drijvend materieel worden gewerkt. In de Tabel 6 zijn de verschillende methodes beschreven inclusief de ervaringen tijdens het rijpen.

Tabel 6: Bewerkingsmethoden

Doel, toepassing, beoordeling	Figuur
Korst breken door middel van ploegen: Door een ploeg over het terrein te trekken (met behulp van een staalkabel en kranen met lieren aan beide zijden van het proefvak) werd de korst gebroken en komt het onderliggende materiaal bloot te liggen. Het leidde niet merkbaar tot betere rijping omdat de indringdiepte beperkt was, terwijl de kosten van deze inspanning hoog waren. <i>De methode is wellicht effectiever als die pas plaatsvindt nadat de korst dikker is (bijv. 30 cm), en indien de gemaakte gangen/greppels onderdeel worden gemaakt van de afwatering, door ze goed te verbinden met de stortkist.</i>	
Omzetten Vaster materiaal kan met een kraan worden omgezet. Hierbij komt nieuw materiaal aan het oppervlak te liggen dat daarmee verder kan gaan rijpen. Dragline schotten kunnen worden ingezet om te zorgen voor voldoende draagkracht voor het benodigde materieel. <i>Daarbij moet de keus worden gemaakt of het bovenliggende materiaal wordt omgezet (en dus onderin de kleirijperij terechtkomt), of aan de kant wordt gezet, waarna het niet meer hoeft te worden behandeld. Dat laatste is in de laatste fase van de kleirijperij Delfzijl gedaan. Tijdens het omzetten wordt ook opgelet om de waterhuishouding optimaal te houden. Dat kan onder anderen door het materiaal op ruggen te zetten en ervoor te zorgen dat het uitredende water ook goed kan afstromen.</i>	
Cultiveren Met een cultivator kan -indien voldoende structuur en dichtheid aanwezig is- de grond effectief worden bewerkt. Daarbij wordt de grond niet omgezet, maar wordt hij "opengetrokken" om drogen te vergemakkelijken. De methode was efficiënt en relatief goedkoop, maar -omdat niet daadwerkelijk werd omgezet- maar beperkt effectief. Het is in de kleirijperij gebruikt om het nog 1 keer te bewerken en vervolgens te verplaatsen naar "eindopslag" ten behoeve van transport.	

4 Onderzoeksresultaten

4.1 Algemeen verloop rijping

Naast de effecten van de verschillen van de verschillende rijpingsmethodes, zijn er ook een aantal algemene conclusies te trekken over het rijpen. Daarin zijn een aantal afzonderlijke stappen in te onderscheiden:

- Het slib bij kleirijperij Delfzijl had een dichtheid van circa 1,2 t/m³ en was daarbij boven het gelpunt. Dat betekende dat er niet of nauwelijks bezinking optrad, waardoor er in korte tijd geen dikke waterlaag bovenop het slib kwam te staan die kon worden afgelaten. Wel zakte het slib snel tijdens de eerste fase van consolidatie.
- Na circa 4 weken begon zich een korst te vormen omdat de verdampingsflux hoger was dan de waterflux naar de bovenkant van het materiaal. Op dat moment werd er bij een aantal vakken een tweede laag slib opgebracht, waardoor tijdens de eerste meetronde een tussenlaag zichtbaar was (de vernatte korst van de eerste laag), die later niet meer kon worden onderscheiden.
- Omzetten had in het eerste jaar vooral een oppervlakkig effect. Pas na 1,5 jaar kon echt tot op de bodem worden omgezet.
- De hoeveelheid zout nam sterk af in de eerste jaren, zonder dat dit de concentratie zout (mg/L poriewater) beïnvloedde. Dit gebeurde vooral in het laatste jaar.
- Het organische stofgehalte nam nauwelijks af in de eerste 3 jaar; pas in het laatste jaar (met de verlaagde zoutgehaltes) trad een verlaging op.
- Bij kleirijperij Kwelder werd met slib met een veel lagere dichtheid ingepompt, waardoor wel veel water door bezinking kon worden afgelaten. Verder had de rijping een vergelijkbaar verloop, waarbij door de lagere initiële hoeveelheid droge stof er minder rijpingstijd nodig was. Daar stond tegenover dat voor die rijping minder tijd beschikbaar was.

4.2 Variatie in laagdikte

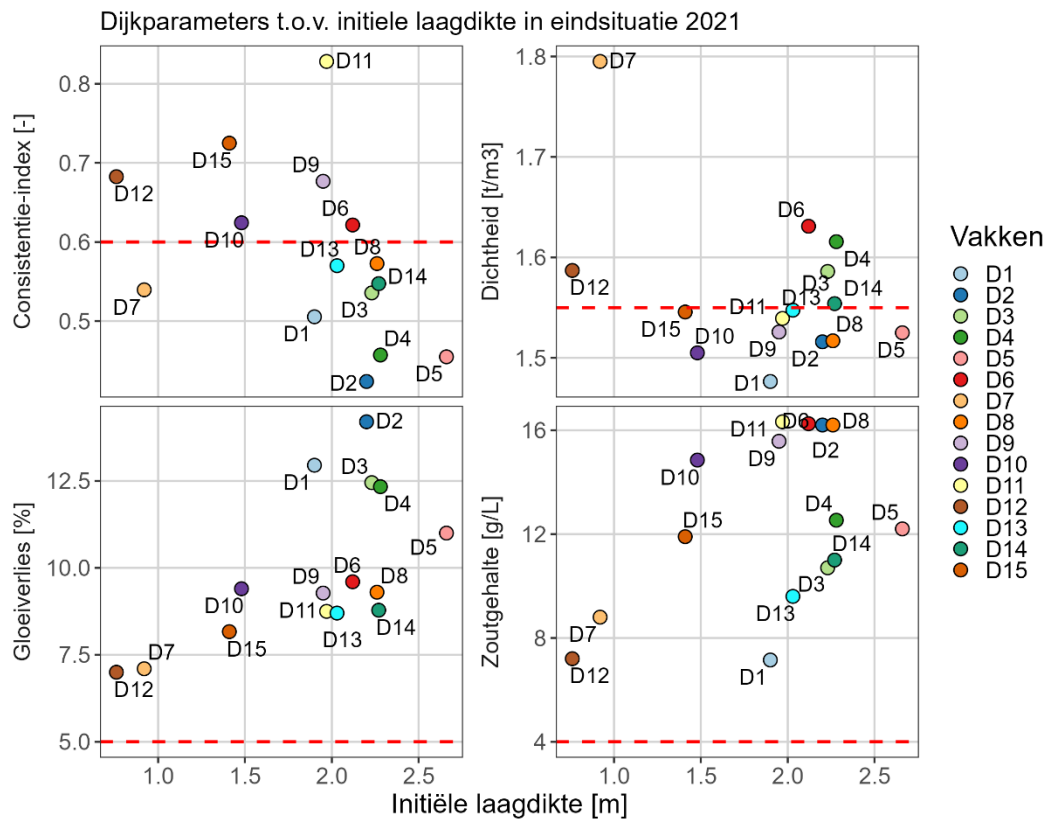
Vooraf zijn een aantal verschillende laagdiktes gekozen. Daarbij was leidend dat er voldoende variatie aanwezig was, maar ook dat de laagdiktes niet té klein waren zodat de hoeveelheid slib niet kon worden geproduceerd voor de aanleg van de Brede Groene Dijk.

De grootste laagdikteverschillen zijn te vinden in de Kleirijperij Delfzijl, waar de initiële laagdikte varieerde van 76 centimeter tot 2,66 meter⁹. Daarnaast werd 1 vak (D4) gevuld met slechts 35 centimeter slib. Al voor de tweede vulslag was dit materiaal zodanig gerijpt dat het op de kant kon worden gezet. Dit is verklaarbaar aangezien de dikte van de korst al zo'n 30 cm bedraagt. In het eerste jaar (2018) was er sprake van een uitzonderlijk droog voorjaar. Een initiële sliblaag van 35 cm met een dichtheid van 1,22 t/m³, geeft een kleilaag van zo'n 15 cm (los). Dit betekent dat met zo'n geringe laagdikte eigenlijk alles aan de atmosfeer wordt blootgesteld, en dat alle klei dus kan rijpen zonder dat het hoeft te worden omgezet. Dit is een belangrijk inzicht. Het allereerste begin in vak D4 gaf dus aan dat je 35 cm slib in 3 droge maanden kan laten rijpen zonder dat je daar nog bewerkingen voor hoeft te doen.

De laagdiktes lijken de belangrijkste drijvende factor voor fysieke rijping. Vakken met een relatief lage laagdikte (Delfzijl D4-kade, D7, D2 & Kwelder K1 en K2) presteerden zelfs met een beperkt aantal bewerkingen en andere werkzaamheden beter dan alle andere scenario's wat de kleicriteria betreft. In Figuur 16 en Figuur 17 zijn de belangrijkste parameters voor het bepalen van de geschiktheid voor dijenklei (consistentie-index, dichtheid, organische stof (gloeiverliesmethode)¹⁰ en zoutgehalte) weergegeven als functie van de initiële dikte.

⁹ Het gaat hier om de cumulatieve laagdikte van beide vulslagen.

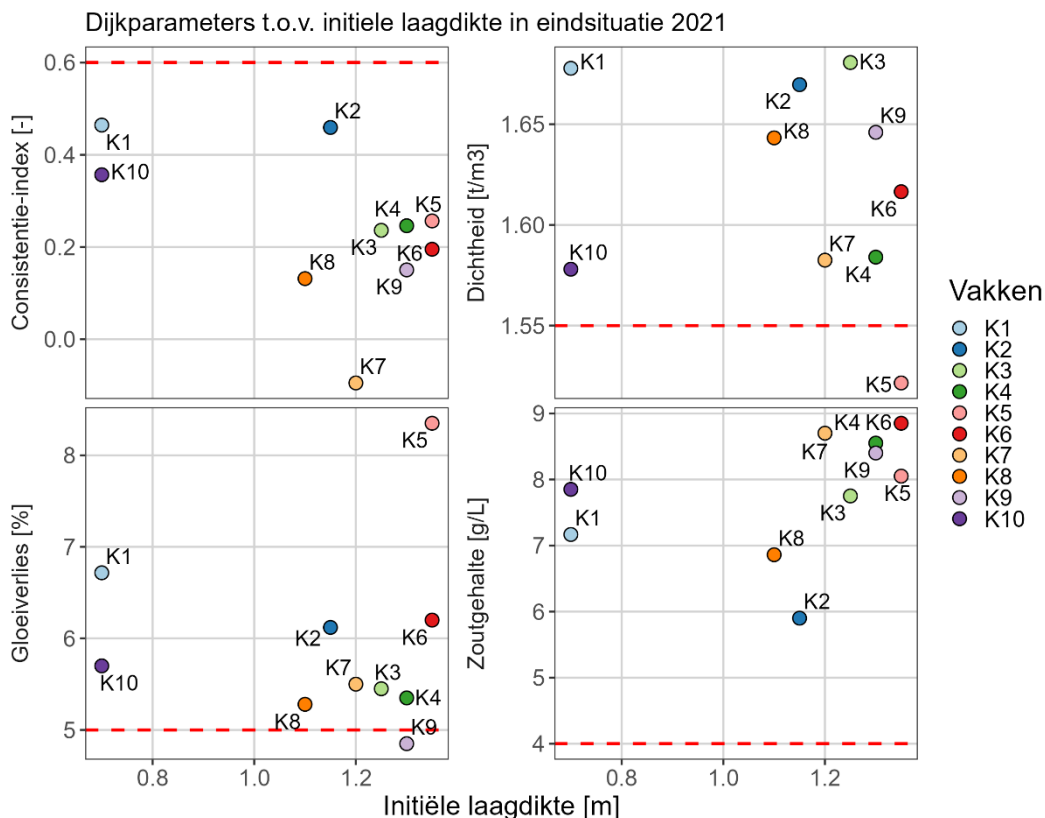
¹⁰ De geotechnische analyse gaat uit van de peroxide-methode. Voor de gloeiverliesmethode zijn echter in dit onderzoek meer gegevens beschikbaar.



Figuur 16: Effect van initiële laagdikte op relevante parameters in de kleirijperij Delfzijl.

De consistentie-index in Kleirijperij Delfzijl (linksboven) geeft aan in hoeverre het watergehalte van het materiaal zodanig is dat het zich gedraagt als vloeistof (waardes < 0), of droog/kruimelig is (waarde = 1). Tijdens het rijpen neemt de consistentie-index geleidelijk toe. Met name de vakken met initiële laagdiktes <1,5 meter werd de waarde van 0.6 behaald. Voor de vakken met hogere laagdiktes lukte dat vaak niet. Bij de ontwikkeling van de dichtheid is een vergelijkbare ontwikkeling te zien. Opvallend is dat in vak D7 de consistentie-index laag bleef, ondanks het bereiken van een goede dichtheid. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de sterkte wijziging van de Atterbergse grenzen door het doormengen van zand.

Voor het organische stofgehalte (weergegeven als gloeiverlies; linksonder) en het zoutgehalte (rechtsonder) geldt dat deze waarden juist moeten afnemen tijdens het rijpen. Hier is te zien dat deze afname ook het sterkste is voor de het laagst gevulde vakken (D7 en D12).



Figuur 17: Effect van initiële laagdikte op relevante parameters in de kleirijperij Kwelder.

Voor Kleirijperij kwelder is het resultaat minder eenduidig. In de vulslagen zijn 2 categorieën te onderscheiden: beperkt gevuld (K1 en K10: 0,7 m na 1 maand consolideren) en meer gevuld (1,05 – 1,3 m). De rijping van de vakken die minder gevuld zijn is aanmerkelijk sneller verlopen (wat te zien is aan de hogere consistentie-index). De dichtheden zijn echter ook sterk afhankelijk van het zandgehalte, en variëren veel sterker. Wat betreft het gloeiverlies is het effect van vulhoogte beperkt.

4.3 Drainage

Drainage vond plaats via de bovenzijde, via de ondergrond en door de omliggende kades. De effectiviteit van de ontwatering op deze locaties is hieronder beschreven.

4.3.1 In de ondergrond

Alleen op de Kleirijperij Delfzijl heeft variatie plaatsgevonden van de drainage door wel of geen drainage aan te leggen. De drainage bestond uit een drainerende zandlaag van zo'n 20 cm met kokos drains (80 mm) die afgevuld zijn met grof drainagezand. De drainagedebieten vormen een aanwijzing dat drainage-effecten beperkt waren (Meshkati, Wesdorp, et al. 2023a), maar het is wel mogelijk dat de aanwezigheid van een drainerende laag een positief effect heeft.

Drainage zorgt ervoor dat er ook aan de onderkant van de sliblaag water uit het slib kan treden. Een bijkomend positief effect van een drainerende zandlaag is dat invallend regenwater - nadat het slib op ruggen was gezet en de zandlaag kwam bloot te liggen - gemakkelijker wordt afgevoerd. Zeker op de kwelder was regenwater in het natte seizoen een probleem. In deze maanden had de rijpende klei, eigenlijk altijd "natte voeten" waardoor het onderste deel van de slib/kleilaag zich weer volzooog met water. Dit kwam niet alleen door het ontbreken van drainage, maar ook door de verdiepte aanleg van het depot op de kwelder. De onderkant van het depot zat hierdoor heel dicht bij de gemiddelde grondwaterstand op de kwelder waardoor het langdurig natte voeten had. Voor toekomstige kleirijperijen is het belangrijk om ervoor te zorgen dat de onderzijde van het depot ver genoeg boven de gemiddelde grondwaterstand zit.

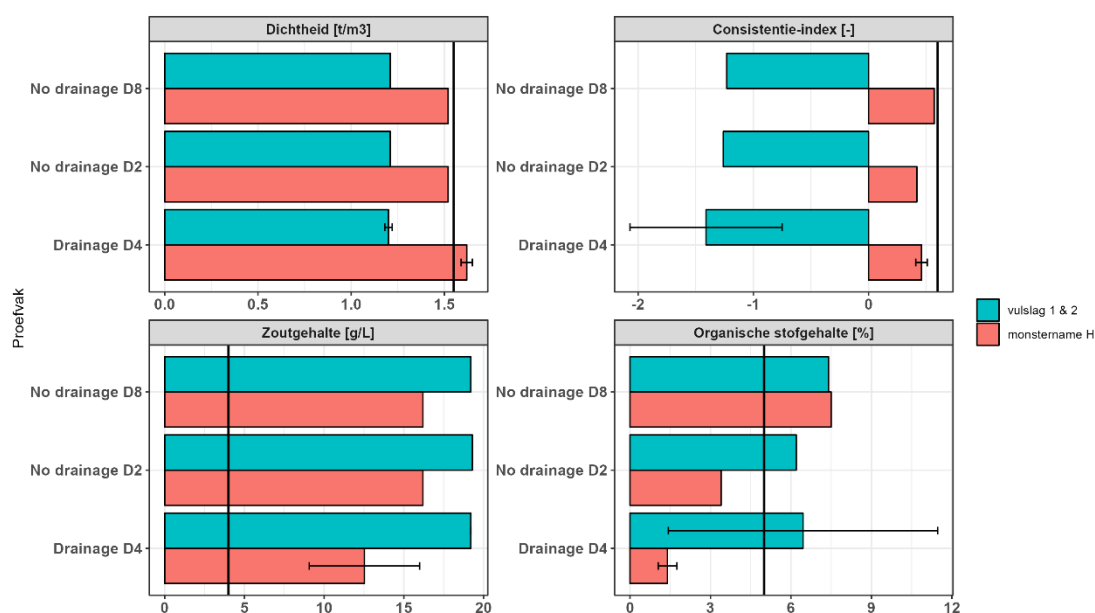
Drainage ontwatert vooral het slib in de onderste laag waardoor bewerkingen ook sneller kunnen plaatsvinden. Vak D8 (zonder drainagelaag) was hier een goed voorbeeld van. Omzetten had hier heel lang nauwelijks effect omdat het slib in de onderste lagen nog zeer vloeibaar was, waardoor het op ruggen zetten hier simpelweg niet ging; het slib vloeide weer uiteen. Mede daardoor zijn in vak D8 ook minder bewerkingen uitgevoerd. Hierdoor had je dus ook een gevolg-effect waardoor het ontwateren langzamer ging.

Bij de analyse vergelijken we vakken D2, D4 en D8, omdat zij een soortgelijke initiële laagdikte hebben, waarbij D4 wel drainage heeft, terwijl de andere twee geen drainage hebben (Tabel 7).

D4 vertoont, mogelijk dankzij de bodemdrainage, een beperkt hogere dichtheid bij de laatste meetronde (1,62 tegen 1,52 t/m³).

Tabel 7: Overzicht van de variatie in geteste parameters tussen proefvak D2, D4 en D6.

Vakken	Vulslagen	Laagdikte	Materiaal buitendijk	Drai-nerende zandlaag	Totaal bewerkingen
D2	2	2.20	klei	nee	9
D4	2	2.28	klei	ja	8
D8	2	2.26	klei	nee	5



Figuur 18: Verschil in dichtheid, consistentie-index, organische stofgehalte en zoutgehalte bij 3 vakken: mét (D4, D8) en zonder (D2) drainerende zandlaag (monstername H vond plaats in september 2021).

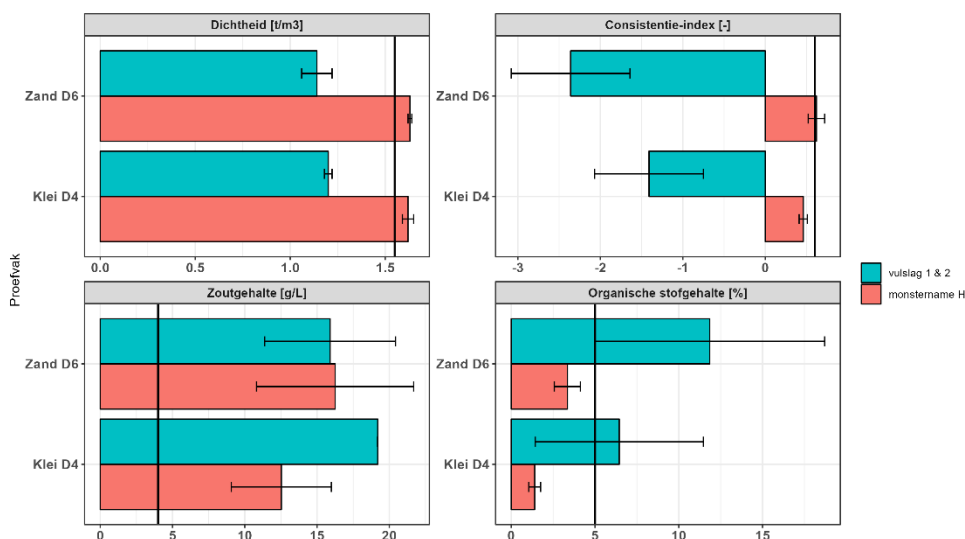
4.3.2 Via de ringkades

Bij het vergelijken van het dijkmateriaal (Tabel 8) is een duidelijk effect te zien van het -beter doorlatende- zand vergeleken met klei en klei/zand mengsel in andere kades (Figuur 10). De dichtheidswinst van D6 (zanddijk) was ongeveer 6% hoger dan D4 (kleidijk). Alle andere gemeten parameters liggen in hetzelfde bereik met uitzondering van organische stof, maar daarbij was het initiële organische stofgehalte in D4 ook lager dan dat van D6 (Figuur 19).

Dit geldt ook als gekeken wordt naar de (iets) hogere consistentie-index van vak D4, die alleen in de 2^e vulslag is gevuld.

Tabel 8: Overzicht van de variatie in geteste parameters tussen proefvak D4 (klei buitendijk) & D6 (zand buitendijk).

Vak-ken	Vul-slagen	Laag-dikte [m]	Gemengd met zoetwater?	In-zaaien	Drai-nage	Drainage-zand	Dijk-materiaal buitendijk	Aantal bewer-kingen
D6	2	2.12	nee	nee	ja	ja	zand	7
D4	2	2.28	nee	nee	ja	ja	klei	8

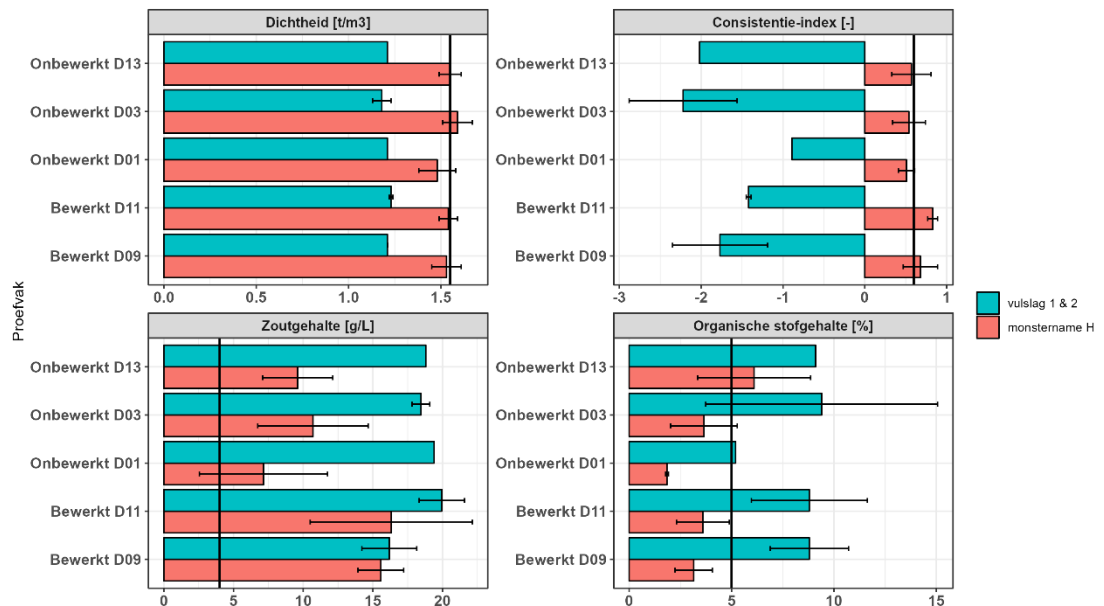


Figuur 19: Verschil in dichtheid, consistentie-index, organische stofgehalte en zoutgehalte bij 2 vergelijkbare vakken met verschillende type kades.

4.4 Bewerkingsfrequentie

De grootste verschillen in bewerkingsfrequentie lagen tussen de drie biologische vakken (D1, D3, D13, die na de eerste bewerkingsperiodes nauwelijks bewerkt zijn) en de overige vakken. Voor de analyse zijn vakken D11 en D9 gekozen als de frequenter bewerkte vakken.

Er lijkt het meeste organische stof uit de klei verwijderd te zijn in de vakken die meer zijn bewerkt (D11 & D9) zijn. In de drie minder bewerkte vakken (D1, D3, D11) is juist minder organische stof verwijderd (wellicht ook veroorzaakt door de groei van planten in deze vakken). De bewerkingsfrequentie heeft daarmee een duidelijk effect op organische stofgehalte van het eindproduct. Het zoutgehalte is ook sterker afgenomen in de vakken die meer bewerkt zijn (D11, D9) dan in de andere vakken.



Figuur 20: Verschil in dichtheid, consistentie-index, organische stofgehalte en zoutgehalte bij vakken met hogere (D9 en D11) of lage bewerkingsfrequentie (D1, D3, D13), waarbij de vulslag (groen) is vergeleken met de laatste monstername (2021).

4.5 Vermindering zoutgehalte tijdens vulproces

Tijdens het vulproces is vak D12 (Delfzijl) eerst gevuld met zoetwater (uit het Oosterhornkanaal), waarna het slib is ingebracht. Om de menging te verbeteren heeft vanaf de zijkant mechanische menging plaatsgevonden. De zoutgehaltes in de eerste meetronde waren echter net zo hoog als in andere vakken, waardoor geconcludeerd kan worden dat de menging niet bijzonder effectief is geweest. Als de menging wel effectief was geweest, was - vanwege het lage zoutgehalte in het Oosterhornkanaal - een veel lager zoutgehalte te verwachten. Wellicht is het beter om te mengen in de transportleiding. Mengten betekent dan ook verdunnen waardoor het slib een lagere dichtheid (en bezinking en ontmenging) krijgt. Bij de Pilot Ophogen Landbouwgrond¹¹ is deze vorm van menging zeer effectief geweest.

Wel gedroeg het materiaal zich in vak D12 anders en zag de toplaag er anders uit: de scheuren in de klei waren veel minder diep. Opvallend was dat de Atterbergse grenzen van dit materiaal zich anders ontwikkelden (minder snel daalden), waardoor de consistentie-index snel hoog genoeg was, terwijl het watergehalte nog hoger was, wat suggereert dat het materiaal toch eerder toepasbaar was. Het is denkbaar dat dat -toch- een effect is geweest van het verdunnen. Daarom wordt aanbevolen om om aandacht te besteden in onderzoek van dit type materiaal.

4.6 Vullen in 1 of 2 vulslagen

De kleirijperij Delfzijl is gevuld in twee vulslagen: één in april en één in juli 2018. De meeste vakken hebben daarmee twee vulslagen gehad. In de tussentijd is eerst water uitgetreden door de drainage en verdampt aan het oppervlak. Op het moment dat de verdampingsflux hoger werd dan de drainageflux van het water dat uit het slib omhoogkwam door bezinking/consolidatie trad uitdroging en scheurvorming op. Dit leidde tot een duidelijk waarneembare korst, die verder uittreden van water tussen de scheuren mogelijk bemoeilijkte. De korst gaf aanleiding tot bewerkingen om deze "stop" in ontwatering te

¹¹ Pilot Ophogen Landbouwgrond is een andere pilot die in het kader van het Eems-Dollard 2050 programma is uitgevoerd.

verminderen en de korstvorming had wellicht vermeden kunnen worden, door het water niet meteen af te laten.

De tweede vulslag, bovenop de eerste vulslag, leidde daarmee mogelijk tot een slecht doorlatende laag tussen het eerste en tweede slibpakket. Deze laag werd in de eerste najaarsmonitoringsronde daadwerkelijk aangetroffen, maar was door vernatting van het bovenliggende en onderliggende slib een jaar later niet meer herkenbaar. Daarmee is het effect van deze laag waarschijnlijk beperkt geweest. Analyses lieten -ook bij gelijke laagdikte- verder geen significant effect zien van de toepassing van 1 of 2 lagen met een dergelijke korte tussentijd van enkele maanden.

4.7 Biologische methode: Inzaaien van vakken

Voor de analyse van de inzaai met planten (van der Ouderaa, et al. 2023) is in 3 vakken op de Kleirijperij Delfzijl (D1, D3 en D13) en in 2 vakken op de Kleirijperij Kwelder (K8 en K10) ingezaaid met zulte en met een mengsel van spiesmelde, strandmelde en klein schorrenkruid. Daarnaast is 1 strook niet ingezaaid die als blancostrook fungeerde: een strook om de verschillen met “geen bewerking” in beeld te brengen. Om de groei niet te belemmeren is op deze locaties niet geploegd of verder bewerkt: wel is een vals zaaibed aangebracht, waarbij de voren zijn getrokken die ook voor inzaai zijn gebruikt (maar zonder dat is ingezaaid). Deze soorten worden in de omgeving ook aangetroffen en gedijen goed in zout milieu. Van de ingezaaide soorten kwamen spiesmelde, strandmelde en zulte op, terwijl dat bij klein schorrenkruid niet het geval was.

De aanwezigheid van vegetatie in een kleirijperij is niet doorslaggevend voor de rijping van zilt slib tot dijenklei in een depot met relatief grote diepte (zoals bij deze proef), maar heeft - in de periode die is bekeken- wel effecten in de bovenste 20 centimeter. Twee jaar doorlooptijd is te kort om effecten van vegetatie op de langzame rijping van slib eenduidig te bepalen. Wel kon worden vastgesteld dat er in de bovenste 30 cm van de bodem enige invloed van vegetatie is.

- Een vegetatiedek zorgt voor een lagere bodemtemperatuur, hoger vochtgehalte en een hoger zoutgehalte in de toplaag (0-12 cm).
- Onder de toplaag (12-24 cm) zien we een toename van oxidatie in de bodem en een (kleine) toename van organische stof. In vergelijking met het al in het gestorte slib aanwezige organisch materiaal kan die verwaarloosbaar zijn.
- Inzaai van vegetatie is niet per se noodzakelijk. Vegetatie komt op uit reeds in het slib aanwezige en aangewaarde zaden; een zaadbank en/of zaadbron in de omgeving zijn daarvoor wel een voorwaarde.

De verschillen met andere niet-ingezaaide vakken wordt niet alleen bepaald door het zaaien zelf, maar vooral door de lagere bewerkingsfrequentie (zie paragraaf 4.4).

5 Geleerde lessen en opgedane ervaring

Voor het eerst sinds de jaren tachtig van de vorige eeuw (Euroklei-project, zie paragraaf 5.1) vond in de afgelopen jaren gestructureerd onderzoek op pilotschaal plaats waarin klei werd gerijpt. Voor het eerst was dat met het doel om tot geschikte klei te komen die voldoet aan de eisen voor dijkkenklei¹². De geleerde lessen wat betreft de rijpingsmethodes en -mechanismen, gekoppeld aan voorafgaand literatuuronderzoek, voorbereidend labonderzoek en opgedane ervaring worden hieronder beschreven en vallen uiteen in 8 hoofdonderdelen:

- 1) Literatuuronderzoek en voorbereidend labonderzoek
- 2) Bronmateriaal
- 3) Depots
- 4) Bewerkingsmethoden
- 5) Rijpingstijd
- 6) Modellerings
- 7) Effecten van weer en klimaat
- 8) Meetmethoden

Uiteraard zijn er nog andere conclusies te trekken, met name op het gebied van regelgeving, samenwerking, de business case en op basis van literatuuronderzoek. Deze zijn beschreven in de eindrapportage Kleirijperij (de Vries en de Reus 2023) en de rapportage over business case (Fiselier en de Reus 2023) en het literatuuronderzoek (Sjenitzer, et al. 2020).

5.1 Literatuur- en voorbereidend labonderzoek

In het historisch (literatuur)onderzoek is gekeken naar eerdere projecten waarbij kleirijpen en het gebruik van gerijpte klei in dijken een rol speelt. Daartoe zijn 25 cases geïdentificeerd waarin omzetting van baggerslib tot bruikbare klei, of het gebruik daarvan in dijken aan de orde komt. Van deze cases zijn er vijf nader onderzocht: Euroklei (Rotterdam), proefdijk Slufter (Rotterdam), DredgDykes (diverse cases in Europa), de Lauwersmeerdijk en de inpoldering van de IJsselmeerpolders (Sjenitzer, et al. 2020).

Uit deze casussen komt het beeld naar voren dat het mogelijk is om in enkele jaren klei te maken, voor een begin laagdikte van maximaal 1-2 meter. De lokale karakteristieken bepalen of dat ook daadwerkelijk het geval is. Uit het literatuuronderzoek volgde de verwachting dat het organisch gehalte (waarvoor een maximumwaarde geldt voor toepassing in dijken) sterk zou afnemen tijdens de rijping, wat een effect heeft op de kleikarakteristieke Atterbergse grenzen, die een indirecte maat zijn voor erosiebestendigheid en de watergehaltes waarbij de klei goed verwerkbaar is¹³. Dit leidt er echter niet toe dat het materiaal een andere erosieklasse krijgt, omdat de positie ten opzichte van de zogenaamde A-lijn van Casagrande niet wijzigt. Voor het zoutgehalte geldt dat ontzilting voornamelijk plaatsvindt als gevolg van regenwater, maar dat de kennis daarover in projecten zich vaak beperkt tot de toplaag (Sjenitzer, et al. 2020).

¹² onder anderen gericht op erosiebestendigheid. In de afgelopen decennia zijn daarvoor de eisen gesteld voor onder anderen de consistentie-index, zoutgehalte en organische stofgehalte (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen 1996).

¹³ De samenhang tussen Atterbergse grenzen en klei-eisen en gedrag tijdens rijping is toegelicht in hoofdstuk 2.4 van de monitoringsrapportage Kleirijperij Kwelder (Meshkati, Wesdorp, et al. 2023b).

Het doel van het voorbereidend laboratoriumonderzoek was het slib te karakteriseren buiten de in eerdere onderzoek genoemde parameters (zoals beschreven in het Kwaliteitsplan Parameters Slib (Van den Heuvel 2018)). Tevens is gekeken naar de invloed van het zoutgehalte op bezinking en (begin van) consolidatie. Op deze manier wordt belangrijke input geleverd voor de mathematische modellering en voor het ontwerp en indeling van de vakken van de pilot.

De bezinking en het begin van consolidatie van het slib dat als uitgangsmateriaal genomen is voor de kleirijperij op de twee proeflocaties is in het laboratorium onderzocht met bezinkproeven. Op basis van de bezinkproeven kan geconcludeerd worden dat op de korte tijdschalen het zoutgehalte geen grote invloed heeft op de snelheid van sedimentatie, de eerste fase van de consolidatie, de dichtheid en de sterkte van het materiaal. Een hogere saliniteit leidt tot een hogere bodemhoogte (minder compactie) en lagere dichtheid. Het materiaal uit Breebaart consolideerde meer (in de proefperiode) in vergelijking met het materiaal uit Delfzijl.

Wat het zoutgehalte betreft betekent dit, dat indien een of meer proefvakken vooraf verdund zouden worden met zoet water, dit geen effecten heeft op de bezinking en het begin van consolidatie (niet positief, maar ook niet negatief), terwijl daarmee wel meteen een significante hoeveelheid zout kan worden verwijderd. Door deze maatregel kan dus wellicht sneller worden voldaan aan de norm voor het maximale zoutgehalte. Of deze norm ook echt aangehouden zou moeten worden, is onderwerp van discussie (zie paragraaf 5.5.1 voor meer context; in de literatuurstudie is de basis voor deze normen beschreven (Sjenitzer, et al. 2020)).

De suction induced consolidation (SIC) test is een laboratorium test die het consolidatiegedrag van slib versneld beschrijft door aanbrengen van onderdruk. Het is daarmee geschikt om in korte tijd voorafgaand aan de rijping informatie over het consolidatiegedrag te verkrijgen. De verkregen gegevens zijn ingezet bij parameterskeuze in de modellering.¹⁴

5.2 Bronmateriaal

De hoofdconclusie is dat het gebruikte bronmateriaal -na rijping- geschikt bleek als dijkenglei, onder de juiste behandelingsvoorwaarden (die in de overige paragrafen verder zijn uitgewerkt). Dit komt overeen met de voorspellingen uit het voorbereidend labonderzoek

De milieukundige keuring van het bronmateriaal was sterk vergelijkbaar met die van de gerijpte klei: de gehalten aan zware metalen bleven sterk vergelijkbaar, waardoor een toetsing aan slibparameters een goede voorspeller was voor de uiteindelijke kleiparameters. Dat valt te verwachten, aangezien voor de meest relevante stoffen (de zware metalen) aan de slibdeeltjes zelf vastzitten en echt vluchtige stoffen (zoals benzeen, toluen, fenantreen) niet in het slib te verwachten zijn. Het geldt uiteraard niet voor anionen als sulfaat, bromide en chloride die onderdeel vormen van het aanhangend zeewater, en daarmee juist wel door de rijping wijzigen.

Wat betreft andere parameters geeft de korrelgrootteverdeling een eerste beeld wat te verwachten valt. Dit bepaalt zowel rijpingssnelheid, als het eindresultaat. Ook slibtype (kleimineralogie) en type organische stof speelt een belangrijke rol, maar dit is een parameter die voor elk van de pilots "vast" lag. Bij vertaling van de resultaten naar ander gebieden moet hier dan ook rekening mee gehouden worden. Dat kan door directe metingen van de kleimineralogie, of door indirecte bepalingen (zoals de Atterbergse grenzen).

¹⁴ In de test werd bij een zeer sterke verlaging van het poriëngetal vastgesteld van 5 naar 1,2 een afname van de doorlatendheid vastgesteld van 4 decades (Meshkati, Wichman en Hanssen 2018).

Met mathematische modellering kan het effect van het type bronmateriaal op het kleirijpingsproces goed in beeld worden gebracht. Daarbij is dan wel van belang dat een aantal parameters wordt bepaald dat niet standaard is, zoals de waterretentiecurve (pF-curve) en de daaraan gerelateerde krimpgrens.

5.3 Inrichting van kleirijperijen

De kleirijperijdepots waren gedimensioneerd voor het maken van proefvakken die groot genoeg waren om op praktijkschaal kleirijpingsstrategieën te onderzoeken, maar klein genoeg om veel verschillende methodes te kunnen testen. Bij een praktijkschaaltoepassing kunnen dus grotere vakken gebruikt worden (van 3-6 hectare), waarin wellicht meerdere stortkisten aanwezig zijn.

Bij de aanleg moet goed gekeken worden naar de ligging van het grondwater, omdat dat een drijvende kracht is voor waterafvoer: zo werd de kleirijperij op de kwelder net te diep afgegraven, waardoor de waterafvoer tijdens de proef bemoeilijkt werd.

5.4 Bewerkingsmethoden

De consistentie van het materiaal dat werd aangebracht verloopt in een kleirijperij van zeer vloeibaar tot vast. Dat maakt dat bij bewerkingen (en overigens ook monitoring) steeds ander materieel nodig is. Het maakt ook dat bewerkingen op verschillende momenten verschillende doelen kunnen dienen. De in de kleirijperijen gebruikte methodes zijn beschreven in paragraaf 3.2.1.

De effectiviteit van de bewerkingsmethodes is sterk afhankelijk van wanneer ze worden ingezet. Bij de keuze over wel of niet ploegen zijn ook de Atterbergse grenzen (en met name de vloeigrens) van belang. Als het vochtgehalte boven de vloeigrens ligt dan lukt het niet om sleuven te trekken door de korst. Het slib onder de korst is dermate vloeibaar dat er geen reliëf of profiel optreedt. De getrokken sleuven vloeien dan direct dicht en het enige dat bereikt wordt is dat de gedroogde korst naar beneden geduwd wordt en dat er weer een verse zwarte natte sliblaag aan het oppervlak komt. Deze wordt dan blootgesteld aan de atmosfeer en zal gaan rijpen. Echter de oorspronkelijke korst die naar beneden gedrukt is zal weer natter worden waardoor het ontwateringsproces deels teniet wordt gedaan.

De meeste effectieve methode is daarom, om bij een watergehalte boven de vloeigrens uitsluitend te sturen op het effectief verwijderen van bovenstaand water. Daar waar een korst zich ontwikkelt, kan die het beste steeds aan de kant worden gezet en kunnen sleuven voor ontwatering worden gemaakt. Het weer heeft een zeer sterk effect op de rijping van de bovenste laag en de planning van de werkzaamheden moeten dan ook gepland worden in de periode april-oktober. Binnen die periode is het weer zelf ook sturend en kan na een natte periode het beste gewacht worden met verdere bewerkingen.

5.5 Rijpingstijd

Van alle beoordeelde parameters was de rijpingstijd het sterkst afhankelijk van de twee hoofdpunten: de gestelde eisen aan het eindproduct en de laagdikte.

5.5.1 Effect ten opzichte van de eisen in de TR Klei voor Dijken

Van de eisen in de Technische Richtlijn Klei voor Dijken (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen 1996) waren zoutgehalte en organische stofgehalte niet binnen de gestelde tijd te halen. Dat was niet mogelijk omdat een zeer groot gedeelte van de zoutvracht moet worden verwijderd om de norm te halen: bij een initieel zoutgehalte van 18 g/L in het porievocht bij een watergehalte van 280% naar 5 g/L bij een watergehalte van 70% betekent dat 93% van het zout dient te worden verwijderd. Daarbij geldt dat het organische stofgehalte pas afneemt, op het moment dat het zoutgehalte voldoende is afgenomen (bij de kleirijperij was dat pas te zien vanaf het laatste jaar; bij zoutgehaltes van rond de 8 g/L). Een kleirijperij

gericht op het behalen van deze eisen zal er dan ook heel anders uit moeten zien. Daarbij kan gedacht worden aan het aanbrengen van dunne laagjes, het vooraf mengen met zoet water (door verdunning neemt het zoutpercentage in het water af), of het accepteren van veel langere rijpingstijden.

Een alternatief is uiteraard om de gestelde eisen niet zo absoluut te beschouwen als in de afgelopen decennia werd gedaan, maar te kijken naar de functionele eisen van de klei in relatie tot de functie die het moet vervullen. Daarmee worden klei-eigenschappen meer onderdeel van het ontwerpproces als geheel en is de afweging om verder te rijpen, óf de klei al eerder op de dijk te brengen een ontwerpkeuze waarbij geoptimaliseerd kan worden op kosten en gebruikswaarde gedurende de gehele gebruikscyclus.

Een dergelijke manier van werken vereist wel een andere inrichting van de “slibketen” en wordt tot nu toe nog maar mondjesmaat toegepast, maar kan wel helpen om meer lokaal materiaal toe te passen en transportkilometers te verminderen. Binnen de Projectoverstijgende Verkenning Dijkversterking met Gebiedseigen grond wordt deze benadering onder de noemer “Van normgestuurd naar grondgestuurd ontwerpen” verder uitgewerkt, waarbij de Brede Groene Dijk (waarin de kleirijperij-klei is toegepast) een casus is (Gerrits, et al. 2022).

5.5.2 Laagdikte en drainage

Zoals beschreven in het vorige hoofdstuk heeft laagdikte het sterkste effect op rijpingstijd. De in de kleirijperij Delfzijl gekozen laagdiktes waren daarbij duidelijk te hoog. Met initiële laagdiktes van 70 centimeter met een dichtheid van $1,22 \text{ t/m}^3$ kan in ieder geval in 2 jaar (of misschien wel in 1 jaar) tot klei worden gekomen die geschikt is voor toepassing. Voor materiaal van deze dichtheid geldt dat het eindvolume ongeveer $1/3^e$ is van het beginvolume. Kortom 90 centimeter slib wordt omgezet in circa 30 centimeter klei. Voor de leesbaarheid is ook in deze rapportage gesproken over laagdiktes: het gaat hier echter om de laagdikte nadat de eerste bezinkfase heeft plaatsgevonden. Het water dat door bezinking binnen enkele uren tot enkele dagen boven het slib komt te staan (zoals dat in bij Kleirijperij Kwelder het geval was) kan immers makkelijk worden afgelaten en de tijdsduur die daarmee gemoeid is, is vergeleken met het totale indrogings-/rijpingsproces erg kort.

De Kleirijperij Kwelder had uitsluitend kleikades. Ook de ondergrond bestaat uit klei, en bovendien is het terrein vooraf iets verlaagd om de oorspronkelijke kwelderbodem te kunnen conserveren voor kwelderherstel na afloop van de Pilot. Het verlagen van het terrein vooraf bemoeilijkte de waterhuishouding tijdens de uitvoering van de Pilot, omdat de onderkant dichtbij het grondwater op de kwelder kwam. Daarmee waren de storkisten uitermate belangrijk omdat dat het enige middel was om regenwater afgevoerd te krijgen. Hiermee waren de depot omstandigheden veel ongunstiger ten opzichte van het depot in Delfzijl.

Bij het kiezen van een locatie dient goed nagedacht te worden hoe de waterhuishouding, t.a.v. het afvoeren van regenwater geregeld moet worden. Zeker als er in de wintermaanden ook klei gerijpt wordt.

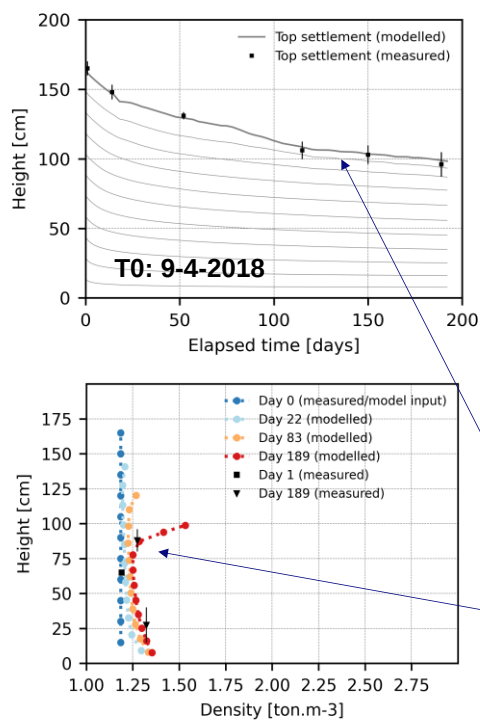
Uiteindelijk is in de Kleirijperij als uitgangspunt genomen dat in 1 keer grote hoeveelheden slib werden ingebracht, en is te zien dat de meest efficiënte methodes juist de laagste laagdiktes waren. Dat roept de vraag op of nóg lagere laagdiktes nog efficiënter zouden zijn.

5.6 Modelling

Hoewel de resultaten van de kleirijperij direct toepasbaar zijn voor rijping met hetzelfde type materiaal, onder dezelfde weer-/klimaatcondities en voor de gekozen uitvoeringsvormen, is het voor de vertaling naar andere condities nodig om te kijken naar de onderliggende processen die tot de rijping leiden. Daarvoor is een model toegepast (het Vardon-model), waardoor effecten van variatie in ingangsmateriaal en weerscondities kunnen worden voorspeld. Dit is relevant omdat met name de verdampingsflux (die bepaalt hoe snel de droging aan de bovenkant gaat, maar die ook voor zuigspanningen in de grond zorgt die de ontwatering versnellen) sterk weersafhankelijk zijn.

Het model is opgezet als 1-dimensionaal model waarin consolidatie afhankelijk is van zwaartekracht, wateroverspanning en zuigspanning. Het model is gekalibreerd met de meetdata van vak D15 (op verschillende hoogtes, en verschillende locaties in het vak) van de kleirijperij en met de weersomstandigheden tijdens het rijpen. Het is vervolgens geverifieerd met andere vakken en toegepast om de effecten van verschillende weerscondities te onderzoeken. De resultaten zijn hieronder weergegeven (Figuur 21).

Modelkalibratie met vak D15



		Gecalibreerde waarden
Krimp	Parameters /Plot	D15
	A_{sh}	0.43
	B_{sh}	0.43
	C_{sh}	2.7
	v_h	1
	ξ_h	1
Water retentie	WCR	0.2
	WCS	6
	α_{WRC}	3
	n_{WRC}	1.15
	m_{WRC}	0.13
	α -modified	10000
Permeabiliteit	A	0.7
	B	4.5
	δ	3
	ϵ_{dess}	0.05
	ξ_{dess}	5
	d_{dess}	10

Gemiddelde hoogte op basis van Drone-inmeting

Watergehalte op basis van Labmetingen.

Figuur 21: Modelkalibratie met gebruik van de eerste 200 dagen van rijping in vak D15 en daarop gebaseerde modelparameters (zie modeldocumentatie voor achtergrond).

De modellering is in meer detail beschreven (Meshkati, Dupuits en van Kessel 2021) en het rijpingsmodel is via EcoShape beschikbaar.¹⁵

¹⁵ Meer informatie beschikbaar via de zoekterm "kleirijperij" op de website www.ecoshape.nl.

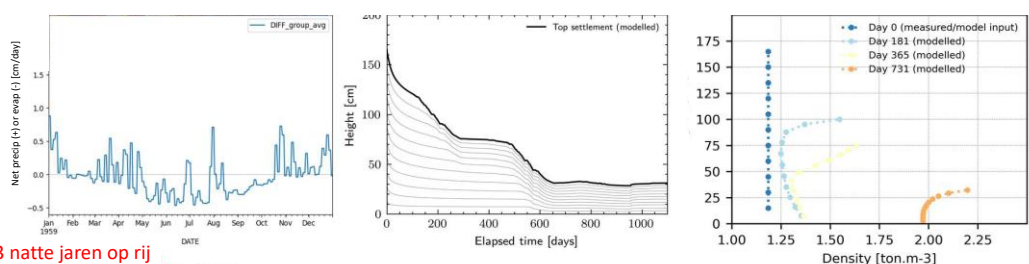
5.7 Effecten van weer en klimaat

Het weer is van groot belang voor het gedrag van rijping: zowel op korte termijn (van week tot week) als de langere termijn (seizoensvariatie). Het effectiefst gebruik van de zon wordt gemaakt op het moment dat de opwaartse waterflux door consolidatie en bezinking zodanig laag is, dat door verdamping ook daadwerkelijk droogval en scheurvorming kan plaatsvinden. Het effect wordt relatief minder belangrijk naar mate dikkere lagen worden opgebracht (zoals de maximale hoogtes gebruikt in de kleirijperij), omdat de beperkende factor dan ook de consolidatiesnelheid zelf is.

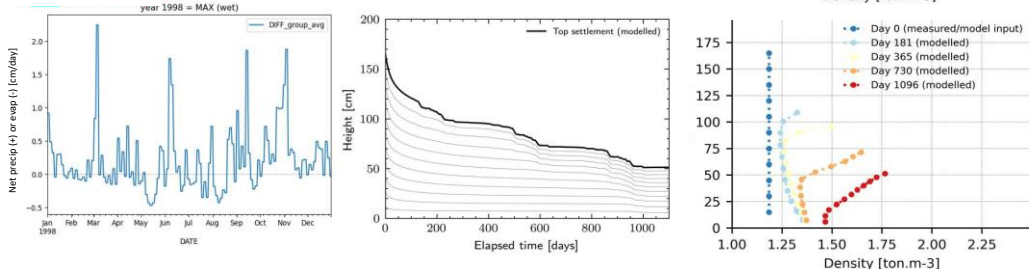
Met mathematische modellering (zie vorige paragraaf) is gekeken hoe het effect van weersomstandigheden (zoals een natte of een droge zomer) effect hebben op de rijping (zie Figuur 22). De tool (die hiervoor separaat is opgeleverd) maakt het mogelijk om

- een risico-analyse te doen in de ontwerpfase op het niet op tijd leveren van de klei (bij voorbeeld het effect van drie hele natte of 3 hele droge zomers)
- effecten van klimaat op de duur van kleirijping in kaart te brengen.

3 droge jaren op rij



3 natte jaren op rij



Figuur 22: Effect van 3 droge (boven) of 3 natte (onder) jaren op rij op de depothoogte in de eerste 3 jaar (middelste figuren) in een scenario zonder bewerkingen en de dichtheidsprofielen op 5 momenten in de tijd (rechts).

5.8 Meetmethoden

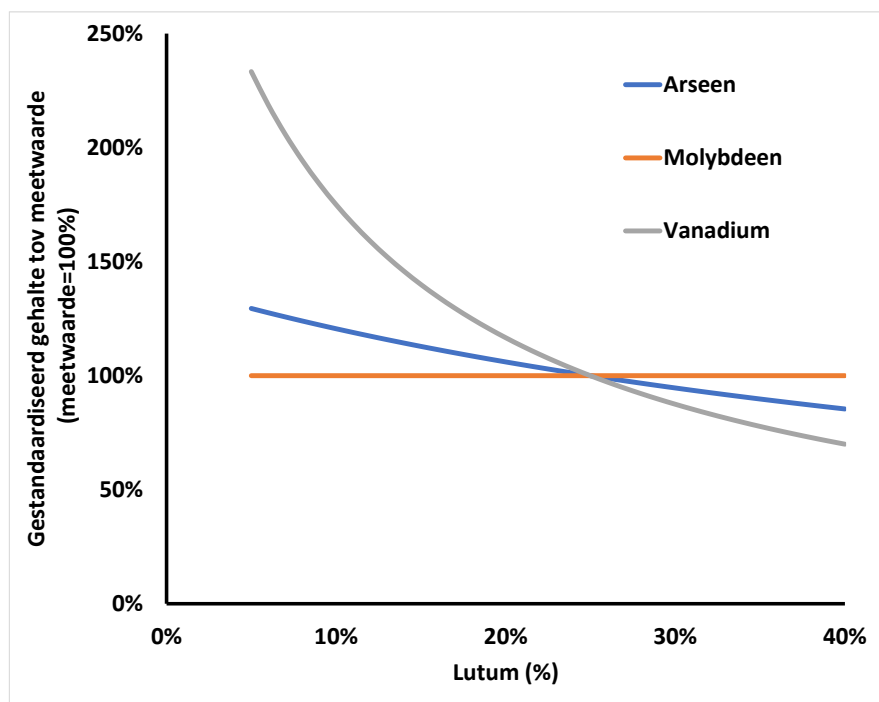
De bestaande standaardmethodes die worden toegepast in milieukundig onderzoek (zoals voorgeschreven in de regeling bodemkwaliteit) en bij de beoordeling van dijkengrond (uit de Technische Richtlijn Klei voor Dijken) vormden de uitgangspunten voor de metingen op de kleirijperij. Hieronder worden een aantal leerpunten weergegeven wat betreft de toepasbaarheid van deze methodes en hoe meetmethodes een effect hadden op het eindresultaat.

5.8.1 Milieukundige parameters

De milieukundige parameters veranderen in principe niet (of zeer beperkt) tijdens het rijpen. Wat wel van belang voor de toetsing aan milieunormen, is de wijziging van de parameters organische stofgehalte (gloeiverliesmethode) en de fijne fractie. Dit zijn niet per se milieuparameters, maar ze worden gebruikt om stofconcentraties om te rekenen naar een “gestandaardiseerd gehalte”, dat vervolgens wordt gebruikt om te toetsen aan milieunormen. De organische stof (gemeten met de gloeiverliesmethode) gaat omlaag door verlaging van de hoeveelheid organische stof, maar ook met het verlagen van het zoutgehalte. De fractie <2 μm gaat verrassenderwijs ook omlaag met de rijping, waarschijnlijk omdat kleine deeltjes aan elkaar kleven, en niet voldoende in de voorbewerking worden “losgemaakt”. Dat heeft tot

gevolg dat het gestandaardiseerde gehalte -bij een gelijk gemeten gehalte- bij veel parameters hoger uitvalt dan aanvankelijk gedacht. Aangezien dit gehalte gebruikt wordt voor toetsing aan milieukwaliteit, heeft dat ook mogelijk gevolgen voor de toetsing.

Ter illustratie is het effect van verschillende lutumgehaltes op het gestandaardiseerd gehalte van drie zware metalen, waarbij het effect van lutum sterk (vanadium), beperkt (arseen) of afwezig (molybdeen) is.



Figuur 23: Effect van het lutumgehalte op het berekende gestandaardiseerde gehalte conform de regeling bodemkwaliteit (Bijlage G.III) ten opzichte van het gemeten gehalte.

5.8.2

Kleiparameters

De parameters die in Nederland gebruikt worden voor de classificatie van klei zijn ontstaan met daadwerkelijke klei in gedachten, en niet met het zoute mariene materiaal dat daarvoor de precursor is. Dat betekent dat een aantal van de parameters waarmee eigenlijk “constitutieve eigenschappen” worden vastgelegd (eigenschappen die afhankelijk zijn van de kleideeltjes, *ongeacht* hun watergehalte) toch wijzigen gedurende het drogingsproces of dat de proeven zeer bewerkelijk zijn. Dat geldt voor de volgende parameters:

- Het organische stofgehalte, bepaald met de geotechnische standaard (de peroxide-methode) is zeer bewerkelijk en de proef duurt erg lang;
- Het organische stofgehalte, bepaald met de gloeiverliesmethode leidt in zout milieu tot een overschatting van het daadwerkelijke organische stofgehalte;
- De Atterbergse grenzen (de rolgrens, maar met name de vloeigrens) nemen sterk af tijdens de rijping en gaan ver buiten het gebied dat wordt beschreven in de figuren van de TR Klei voor Dijken. Dat heeft drie praktische effecten waarmee in de beoordeling rekening gehouden moet worden:
 - Op basis van de Atterbergse grenzen en de minimale plasticiteitsindex kan worden berekend hoeveel water moet worden verwijderd voordat de klei zal voldoen. Omdat in dat proces ook de Atterbergse grenzen lager worden, zal in de praktijk meer water worden verwijderd.
 - De Atterbergse grenzen worden ook gebruikt om te bepalen of het materiaal zich boven of onder de A-lijn bevindt en of de erosieklasse geschikt is. De wijziging van de eigenschappen van de klei in de kleirijperij leidde tot een verplaatsing van de parameters parallel aan de A-lijn: daarmee wijzigde de erosieklasse niet.

- De Consistentie-index wordt gehanteerd als indirecte eis voor de dichtheid van klei bij toepassing voor het aanleggen van dijken. Een consistentie-index van 0,60 voor kernmateriaal en 0,75 voor afdek materiaal wordt gehanteerd (met een bovengrens van 0,9 of 1). Atterbergse grenzen die hoger liggen geven dus een hoger watergehalte waarbij de consistentie-eis nog geldt. Anders gezegd hoge Atterbergse grenzen geven een lage dichtheid van je verdichte eindproduct van klei in de dijk. Initieel kwam de berekende einddichtheid uit op 1,55 t/m³. Als gevolg van de dalende Atterbergse grenzen tijdens de uitvoering van de Pilot Kleirijperij ging ook de dichtheid omhoog van het beoogde eindproduct. Uiteindelijk is klei geleverd met een gemiddelde einddichtheid van rond 1,65 t/m³, passend bij een consistentie-index van 0,75.

5.9 Beantwoording onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen beschreven in het Plan van Aanpak (EcoShape 2017a) worden in deze rapportage steeds in delen beantwoord. Hieronder volgt een bespreking van de antwoorden.

De hoofdvraag van het onderzoek is:

- *Wat zijn de effecten en karakteristieken van kansrijke kleirijpingsmethodes met slib uit de Eems-Dollard?*

In de kleirijperij is gekeken naar kleirijping waarbij materiaal tot een hoogte van 70 cm tot circa 2 meter is ingebracht in kleirijpingsvakken en waarbij verschillende methodes van (voor)bewerking zijn getest. Daarbij was in het vak met de laagste gekozen laagdikte het beste mogelijk om tot -met materiaalgericht ontwerpen- geschikte klei te komen. Een goede waterhuishouding is daarbij van groot belang, waarbij afwatering aan de boven- en zijkanten steeds moet worden gegarandeerd. Bewerken, met name door middel van het trekken van sleuven, maar met name door het omzetten, is van belang om die waterafvoer op peil te houden, en afstromingsafstanden zo kort mogelijk te houden. Alleen in een incidenteel gevuld vak van 40 centimeter was een dergelijke bewerking niet nodig. Het actief stimuleren van plantengroei door middel van inzaaien had geen toegevoegde waarde buiten de bovenste 30 centimeter. Voor drainage konden geen definitieve conclusies worden getrokken en is de afweging onderdeel van een kosten-baten analyse, waarbij de baten voornamelijk liggen in de drainage in de eerste maanden, én in afwatering/drainage wanneer materiaal op ruggen is gezet. Bewerkingen zullen steeds afhankelijk zijn van de consistentie van het slib en zijn met name nuttig nadat het materiaal droog genoeg is (lager dan de vloeigrens).

De belangrijkste *afgeleide* kennisvragen bij deze hoofdvraag zijn voor de geselecteerde rijpingsmethodes:

- Hoe verloopt de rijping (wat zijn de fysische eigenschappen en watergehalte)?*
- Wat is de ontwikkeling van het zoutgehalte?*

Deze twee vragen kunnen het beste gezamenlijk worden behandeld: de ontwatering, ontwikkeling van het zoutgehalte zijn namelijk het best te zien als een tweetrapsraket: eerst vindt ontwatering plaats volgens de bekende processen van bezinking en consolidatie. Tijdens deze fase wordt weliswaar veel zout verwijderd uit het slib (want dit wordt samen met het poriewater afgevoerd) maar hierdoor neemt het zoutgehalte (de concentratie zout uitgedrukt in gram per liter) nog niet af. Vervolgens komt een periode waarin ook het zoutgehalte (door intredend) regenwater langzaam kan worden verlaagd. Pas als het zoutgehalte voldoende is gedaald, zal ook het organische stofgehalte kunnen dalen. Dit komt omdat de biologische omzettingssnelheid die daarvoor nodig zijn in zout milieu lager zijn en - vanwege het aanwezige sulfaat- ook minder van de organische stof kunnen afbreken. Pas als sulfaat voldoende is verwijderd, zuurstof kan intreden, en daarmee de redoxpotentiaal stijgt, kan op grotere schaal afbraak van organische stof plaatsvinden.

De daling van organische stof en zoutgehalte is in de periode van de kleirijperij beperkt geweest. De normen vanuit de TAW Klei voor Dijken worden niet binnen 2 jaar behaald voor zout of organische stofgehalte. Dat betekent ook dat de emissie van CO₂ (die gevormd wordt bij de oxidatie van organische stof) uit deze klei lager is dan vooraf ingeschat (Kox en Jansen 2022). Wellicht dat een gedeelte van de organische stof later (na toepassing) nog oxideert, maar het kan ook dat het materiaal na toepassing stabiel blijft.

De normen zelf, voor klei op dijken, veranderen ook: er wordt meer gestuurd op functionele parameters (zoals erosiebestendigheid, en de daaraan gerelateerde structuurvorming). Klei met een verhoogd zout- en organische stofgehalte bleek daarmee een prima geschikt om een dijk te bouwen. Monitoring in de komende jaren binnen het project Monitoring Brede Groene Dijk zal daarvoor meer informatie moeten verschaffen.

c) Wat is de ontwikkeling van de natuurwaarde?

De potentiële natuurwaarde van de kleirijperij zit hem mogelijk in de tijdelijke natuur, bijvoorbeeld als habitat voor vogels. Bewerkingen om de klei rijp te krijgen werken daarvoor verstorend, en juist in een pilot (waarin veel vakken zijn, en bewerkingen dus relatief lang duren) had dat een zodanig effect dat de monitoring hiervoor is stilgelegd. Voor de pilot kan geconcludeerd worden dat er geen noemenswaardige ontwikkeling van (tijdelijke) natuurwaarden is waargenomen. De natuurwaarde in een opgeschaalde variant is wellicht groter, maar zal alleen op grotere schaal kunnen worden geanalyseerd. Daarbij is het eindresultaat sterk afhankelijk van de bewerkingsvorm: een extensieve vorm waarin meer tijd beschikbaar is, maar minder wordt bewerkt levert minder verstoring op dan een intensief systeem.

d) Wat zijn de voorwaarden voor een sluitende business case?

De business case is niet beschreven in deze rapportage maar in Fiselier en de Reus (2023) waarnaar voor deze conclusies wordt verwezen. Voor een business case is de rijpingstijd gecombineerd met de hoeveelheid oppervlak de meest bepalende factoren: bewerkingen zijn relatief kostbaar. Een sluitende business case zal afhangen van:

- de marktprijs (die sterk varieert)
- de eisen die aan verwijdering van organische stof en zout worden gesteld (en die de rijpingstijd bepaald)
- de waarde die wordt toegekend aan het verwijderen van slib (en daarmee de verhoogde economische waarde) uit de Eems-Dollard.

Literatuur

- Boskalis en Van Oord. 2020. „De Aanleg van een Proefdijk.”
- de Vries, B, en S de Reus. 2023. *Pilot Kleirijperij: van slib tot dijk. Kennis en ervaring over het omzetten van slib naar klei voor toepassing in bouwprojecten*. EcoShape.
- Economie en Ecologie Eems-Dollard in balans. 2015. „Eindrapport MIRT-onderzoek.”
- EcoShape. 2018a. „Pilot Kleirijperij 1.2.2. Vulplan.”
- EcoShape. 2017a. „Plan van Aanpak; Uitvoering Pilot Kleirijperij.”
- EcoShape. 2017b. „Voorlopig Ontwerp Slibdepot. 154731_DDE_1006_DESIGN.”
- Fiselier, J, en S de Reus. 2023. *Business Case Kleirijperij. Verkenning van kosten en baten van de kleirijperij*. RHDHV BC8760WATRP1911120913. EcoShape.
- Gerrits, A., A. Wiggers, A. Kooij, J. van der Hoef, J. Schreurs, M. Bos, M. van der Meer, et al. 2022. *Technisch kader toepassing van gebiedseigen grond*. HWBP (POV dijkversterking met gebiedseigen grond).
- Kox, MAR, en S Jansen. 2022. *Greenhouse gas emissions from the clay ripening pilot “Kleirijperij”*. Deltares rapport 11202895-002-BGS-0002. EcoShape.
- Meshkati, E, B Wichman, en J Hanssen. 2018. *Pilot Kleirijperij. Werkpakket 4.2.1. Voorbereidende laboratoriumproeven kleirijperij*. Deltares rapport 11201344-000-ZKS-0006. . EcoShape.
- Meshkati, E, G Dupuits, en T van Kessel. 2021. *Consolidation and ripening modelling of pilot Kleirijperij. Calibration, validation and hindcast*. Deltares and HKV presentation. EcoShape.
- Meshkati, E, K Wesdorp, T Vreeken, en WRL van der Star. 2023a. *Monitoringsrapportage Kleirijperij Delfzijl*. Deltares rapport 11201344-002-ZKS-0003. EcoShape.
- Meshkati, E, K Wesdorp, T Vreeken, en WRL van der Star. 2023b. *Monitoringsrapportage Kleirijperij Kwelder*. Deltares rapport 11201344-002-ZKS-0005. EcoShape.
- Sjenitzer, S, D Derks, WRL van der Star, en E Meshkati. 2020. *Historisch (literatuur) onderzoek Pilot Kleirijperij. Literatuurstudie, werkpakket 4.1.1*. Royal HaskoningDHV en Deltares rapport WATRC_BC8760-111_R0001_901691_f1.0. EcoShape.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. 1996. „Technisch rapport Klei voor dijken.”
- Van den Heuvel, M. 2018. *Kwaliteitsplan Parameters Slib, WP1.2.7*. EcoShape.
- van der Ouderaa, I, M van Puijenbroek, K Elschot, P Essink, en M Scholl. 2023. *Building with Nature - Pilot kleirijperij – effecten van biologische bewerkingsmethoden op het rijpen van klei*. Wageningen Marine Research rapport C058/22. EcoShape.
- van Steijn, P, en M Klein Breteler. 2021. „Onderzoek Geschiktheid Deltaklei in kader van demonstratieproject Brede Groene Dijk. Stap 9: Meting erosiebestendigheid deltaklei met Deltagootproeven. Deltares Rapport 11206194-002-HYE-0014.”

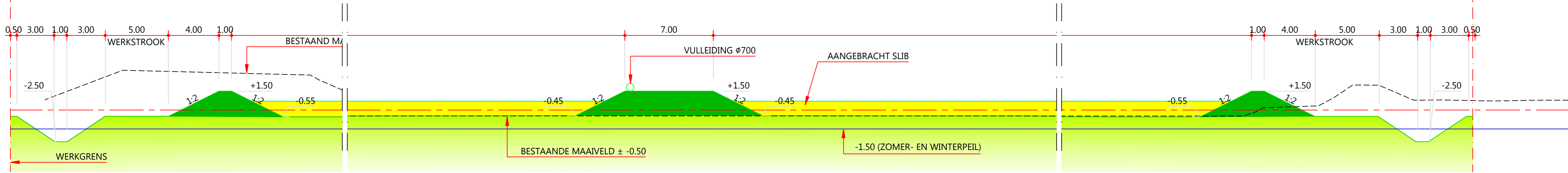
A Ontwerptekeningen depots

A.1 Ontwerp kleirijperij Delfzijl

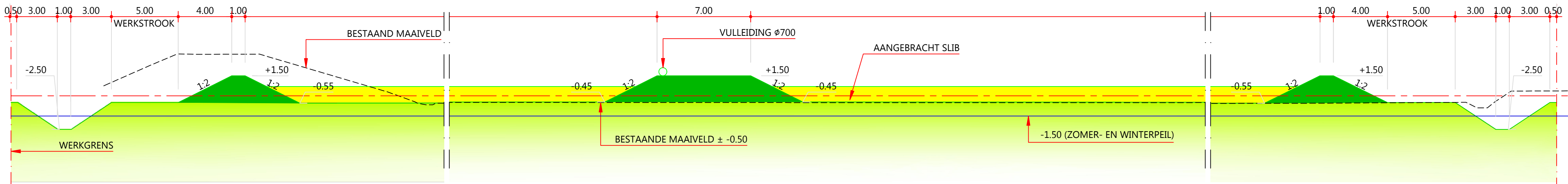


CODE	BESCHRIJVING	AANTAL (NUMMER)
F1	STANDAARDVAK	3 (D1, D8, D14)
F2	STANDAARDVAK ZONDER ZANDDRAINAGE	2 (D2,D3, D13)
F3	STANDAARDVAK IN 1 KEER GEVULD	2 (D4, D12)
F4	STANDAARDVAK, 0.5m EN 1m LAAGDIKTE	2 (D5, D10)
F5	STANDAARDVAK MET ONWERKEN/VOREN TREKKEN MET HOGERE FRE	1 (D6)
F6-OPTIE 1	STANDAARD MET ZOET WATER OPZETTEN IN DE WINTER	1 (D15)
F6-OPTIE 2	STANDAARDVAK MET ZOETWATER BIJMENGEN BIJ VULLEN (EERSTE VL	1 (D15)
F-OPTIE	ZAND ALS DEKLAAG	-
B1	STANDAARDVAK MET INGEZAID/GEPLANT MATERIAAL 1	1 (D7)
B2	STANDAARDVAK MET INGEZAID/GEPLANT MATERIAAL 2	1 (D11)
T1	TOESLAGMATERIALEN / RESERVE	1 (D9)

OVERZICHT
SCHAAL 1 : 2000



DOORSNEDEN A-A
SCHAAL 1 : 200



DOORSNEDEN B-B
SCHAAL 1 : 200

OPMERKINGEN

- MAATVOERING IN M
- HOOGTEMATEN IN M T.O.V. N.A.P.
- COORDINATENSTELSEL : RD
- LOCATIES STORTKISTEN INDICATIEF
- STORTLEIDINGEN IN VELD UITKOMEND OP HELE BUISLENGTES (TOEPASSEN PASSTUK NIET NOODZAKELIJK)

CONCEPT 0.2
20.12.17

0 50.0 m 100.0 m
SCHAAL 1:2000

Stichting EcoShape
Kleirijperij Valgenweg / GSP-terrein

Voorontwerp
Voorlopig ontwerp slibdepot

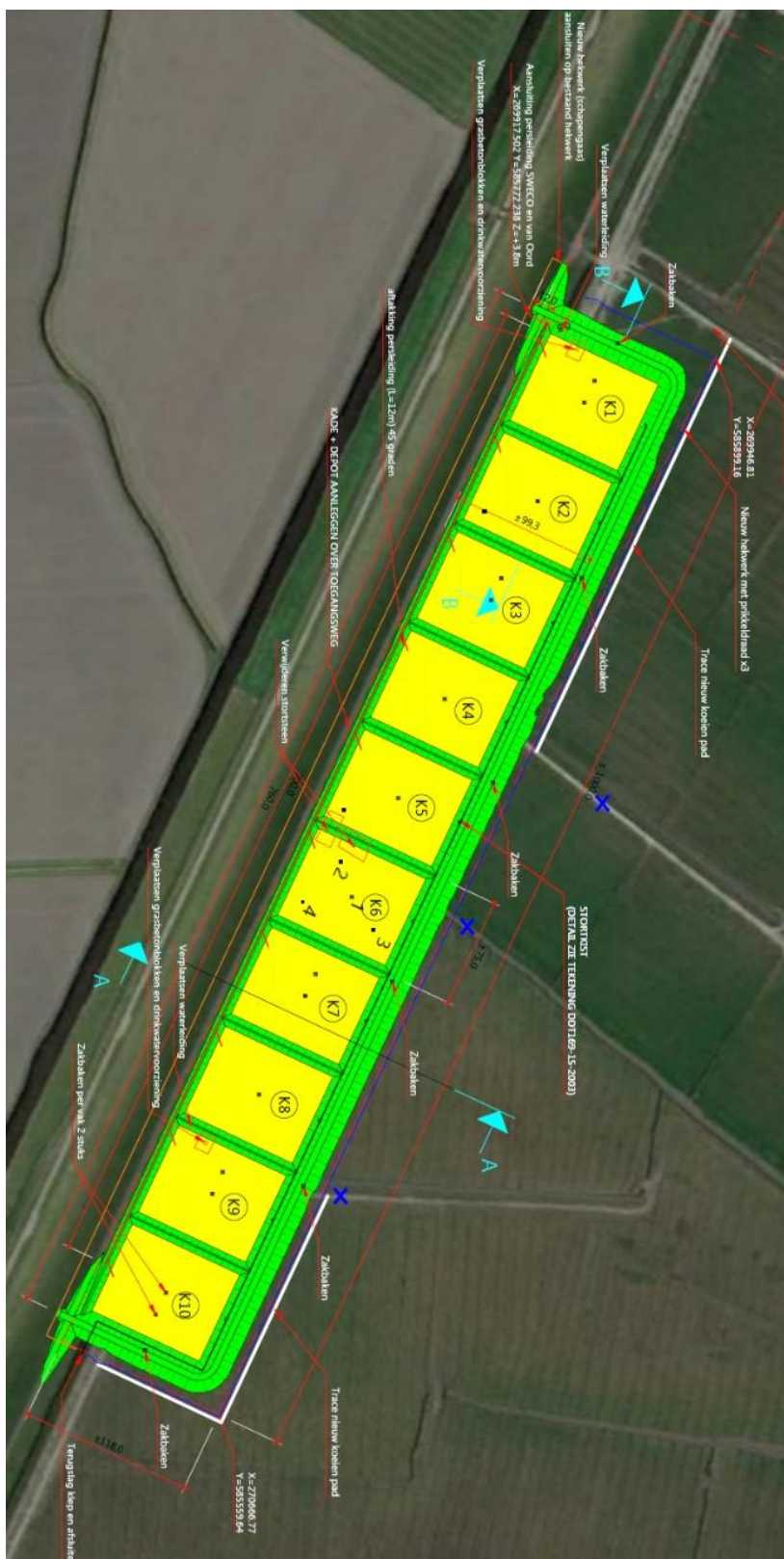
EcoShape
building with nature

Getekend J. Meesters
Gecontroleerd
Goedgekeurd
Datum 20/12/2017

Schaal 1 : 2000 1:200
154731_DDE_1006
Formaat A1

DATE: 20/12/2017 TIME: 12:20

A.2 Ontwerp kleirijperijs Kwelder



B Hoofdoverwegingen opzetten van een kleirijperij

Een belangrijke doelstelling van de Pilot Kleirijperij is om een beeld te schetsen op welke wijze opschaling voor het rijpen en leveren van grotere hoeveelheden klei zou kunnen worden gerealiseerd. De onderzoeken, metingen en ervaringen binnen de Pilot Kleirijperij liggen ten grondslag aan een advies hiervoor. Dit advies geldt voor het rijpen van marien slib (zoals het bijvoorbeeld voorkomt in de Zuidwestelijke Delta en de Eems-Dollard).¹⁶

Zes kritische factoren spelen hierbij een rol: ruimte, tijd, omgevingsfactoren, rijpingsmethodieken, kosten en risico's.

1. Ruimte

- Beschikbare hoeveelheid terreinoppervlak om slib te rijpen
- Locatie van dit terrein ten opzichte van de slibbron + wijze van slibtransport
- Locatie van dit terrein ten opzichte van de eindlocatie + wijze van kleitransport
- Beschikbare hoeveelheid terreinoppervlak om gerijpte klei (tijdelijk) op te slaan

2. Tijd

- Beschikbare hoeveelheid tijd om het totaal volume aan klei te produceren
- Invloed van de seizoenen op het rijpingsproces
- Beste moment voor inbrengen van het slib
- Beste moment voor het leveren van de gerijpte klei

3. Omgevingsfactoren

- Invloed van het weer op het rijpingsproces
- Invloed van de ondergrond op het rijpingsproces
- Invloed van klei rijpen op de ondergrond en de toepassingslocatie (milieuperspectief)
- Milieutechnische en fysische kwaliteit van het te leveren slib
- Levering van slib
- Sociaaleconomische effecten op de omgeving door veranderende activiteiten

4. Rijpingsmethodieken

- Geotechnische eigenschappen ingangsmateriaal
- Eisen eindproduct
- Inrichting depot
- Drainerende zandlaag en/of drainageleidingen als ondergrond
- Moment en hoeveelheid van in te brengen slib (laagdikte)
- Waterhuishouding
- Ringsloot + eventueel afvoeren van zout water
- Omzetten van de klei
- Begroeiing
- In depot zetten van klei

¹⁶ Dit is een uitgebreide versie van het overzicht opgenomen in De Vries en de Reus (2023)

5. Indicatie laagdikte voor optimale rijpingsstrategie

6. Kosten

- Kosten per m³ gerijpte klei
- Kosteneffect bepalen voor langere uitvoeringstijd met minder omzetten
- Flexibiliteit levering klei als gevolg van omgevingsfactoren

B.1 Ruimte

Ruimte en tijd zijn aan elkaar gekoppeld bij een bepaalde hoeveelheid klei die moet worden geproduceerd. Als er meer ruimte beschikbaar is, dan neemt logischerwijze de hoeveelheid klei die geproduceerd kan worden toe. Belangrijk is dus te bepalen hoeveel klei er per hectare kan worden geproduceerd. Bij hoeveelheden klei is het belangrijk om duidelijk te beschrijven wat er met een ton of m³ klei wordt bedoeld (verdicht, los, nat, verzadigd etc.), omdat dat beeld bij de diverse partijen kan verschillen.

De positionering van het kleirijperij depot ten opzichte van de slibbron en de eindlocatie van de te leveren klei heeft grote invloed op latere transportkosten en de daarbij behorende druk op de omgeving. De meest logische manier (minste omgevingshinder en laagste kosten) om grote hoeveelheden slib over land te vervoeren is middels een persleiding. Gerijpte klei wordt per beunschip of vrachtwagen getransporteerd aangezien transport via persleiding niet mogelijk is zonder het opnieuw toevoegen van proceswater. Bij het vastleggen van een terreinlocatie dient de wijze van transport goed afgestemd te zijn met alle belanghebbenden (aannemers, bewoners, waterschap, gemeenten, terreineigenaar/-beheerder, Rijkswaterstaat etc.) zodat vergunningen kunnen worden geregeld en iedereen zich achter de plannen kan scharen.

Afhankelijk van de gekozen werkmethode kan er gekozen worden om terrein beschikbaar te houden voor opslag van gerijpte klei, bijvoorbeeld om bij het leveren van de klei een continue aanvoer te hebben. Het extra / tussentijds opslaan van klei op een andere locatie kost relatief veel geld; transportbewegingen en tussentijdse opslag moeten altijd geminimaliseerd worden.

B.2 Tijd

Tijd, ruimte en kosten zijn onlosmakelijk aan elkaar verbonden. Het snel uitvoeren van een project kan veel geld besparen, omdat het in stand houden van projectteams, logistiek, vergunningen, terreinhuur etc. veel geld kost. Echter, zal bij het laten rijpen van klei, het projecttempo bepaald worden door de hoeveelheid klei die jaarlijks geproduceerd kan worden. Dit is vooral afhankelijk van de grootte en ligging van het terrein dat er beschikbaar is om de klei te laten rijpen, en in mindere mate afhankelijk van de gekozen werkmethode. Hierbij wordt er dus vanuit gegaan dat er voldoende slib beschikbaar is en dat er een grote vraag is naar klei. Het zou mogelijk kunnen zijn om kosten op bewerken te besparen door simpelweg te wachten, maar daar hoort dan vervolgens wel een langere uitvoeringstijd bij. Het exacte optimum is sterk afhankelijk van grondprijs, ingangsmateriaal en klimaat en moet voor ieder project apart worden bepaald.

Seizoenswerking is een andere belangrijke factor. In Nederland zal het rijpen vooral in de warmere en veelal drogere zomermaanden plaatsvinden. Daarbij mag ook niet overal het gehele jaar door aan bijvoorbeeld een dijk worden gewerkt. Belangrijk is dat de planning op alle randvoorwaarden wordt afgestemd. Het heeft voor het rijpingsproces bijvoorbeeld niet zoveel zin om in de wintermaanden de klei om te zetten. Ook zal reeds gerijpte klei in de wintermaanden weer natter worden. Seizoens-denken is daarmee essentieel. Het vullen van de depots met slib kan het beste uitgevoerd worden in het late najaar, zodat in de winterperiode het eerste deel van de consolidatie kan plaatsvinden, waardoor een deel van het water al kan afstromen. Vervolgens komt het zomerseizoen waarbij de daadwerkelijk rijping van het materiaal plaatsvindt en tevens eventuele rijpingsbevorderende maatregelen (bewerkingen) uitgevoerd kunnen worden. Zeker als het slib met een lage dichtheid wordt ingebracht, kan het bezinkingsproces en een eerste stuk consolidatie in het natte koude

seizoen plaatsvinden. Zodra de zon begint te schijnen en het warmer wordt kan vervolgens het water eraf gelaten worden zodat het echte rijpingsproces kan beginnen.

Daarnaast speelt de beschikbaarheid van slib een rol in de planning voor het vullen van de depots. Indien gebruik gemaakt wordt van onderhoudsslib zal ook de planning van de baggerwerkzaamheden een rol spelen. Onderhoud van havens vindt doorgaans gedurende het gehele jaar plaats. De onderhoudsbehoefte zit ook niet in één maand, dus alle depots vullen in één maand is vanuit het onderhoudsbaggeren gezien niet realistisch.

Er kan ook gekozen worden om de grotendeels gerijpte klei in de winter te laten liggen, deze klei bij aanvang van het zomerseizoen nog wat na te laten drogen en vervolgens te leveren en te verwerken in een dijk. De consequentie is echter dat het depot dan niet elk jaar gevuld kan worden. Ook het in depot zetten van klei kost geld. Het onnodig verplaatsen van klei moet zoveel mogelijk worden voorkomen.

B.3 Omgevingsfactoren

Het weer en het lokale klimaat is de belangrijkste omgevingsfactor voor het rijpingsproces. Belangrijk dus om alles zo in te richten dat de invloed van het weer beheersbaar is. Idealiter heeft weer geen invloed op de planning en organisatie, en alleen op kosten. Oftewel, in een natte zomer moet je vaker de klei omzetten. Indien het gehele project 10 jaar duurt zijn deze kosten goed in te schatten bij een normale afwisseling van natte en droge zomers (3x natte zomer, 4x normale zomer, 3x droge zomer). Het omzetten of het op een andere manier bewerken van het materiaal zal toch een soort jaarlijks terugkerend proces zijn, waarvan de frequentie afhankelijk van de weersomstandigheden zal verschillen.

Als de ondergrond van klei is, zal water nauwelijks in de bodem dringen. Voor het ontwateren en rijpen van klei heeft de ondergrond in dat geval dus weinig tot geen effect. Andersom is er wel een effect. Indien meerdere jaren zout slib wordt aangebracht, zal de ondergrond en het grond- en oppervlaktewater gaan verzilten. In welke mate dit zal plaatsvinden en hoelang het duurt voordat de situatie van voor het kleirijpen is bereikt is moeilijk in te schatten, maar zeker meetbaar. In hoeverre dat een zorgpunt is, is afhankelijk van de aanwezige hoeveelheid zout in het grondwater; en dus ook vaak van de afstand tot de zee. Het teruggaan naar oorspronkelijk aanwezige waarden zal jaren in beslag nemen. Bovendien zul je bij inrichting van een kleirijperij in binnendijkse gebieden aandacht moeten hebben voor de eventuele uitstralingseffecten buiten het projectgebied en het nemen van mitigerende maatregelen.

Bij het onttrekken van het slib moet vooraf gekeken worden naar de eigenschappen, zowel milieukundig als fysisch, om na te gaan wat de toepasbaarheid van het materiaal is. Daarbij speelt zandgehalte een rol (10-20% zand zal de rijping vergemakkelijken)¹⁷, maar ook slibtype.

Bij het baggeren van geschikt materiaal kan financieel het beste worden aangesloten bij baggerwerkzaamheden die toch al moeten worden uitgevoerd (zoals in havens en vaargeulen). Daarbij kan het zijn dat de timing niet altijd aansluit: ook in de zomermaanden is er onderhoud, een moment dat de kleirijperij mogelijk geen slib wil ontvangen. Daarnaast kan de wijze van baggeren en het aanwezige (bagger)materieel ongeschikt zijn voor het op gewenste wijze inbrengen van slib in het depot. Tijdige afstemming hierin is belangrijk. Het is een voordeel als slechts een deel van de baggeropgave op land hoeft te worden gebracht, zodat het juiste materiaal in de juiste periode wordt geselecteerd voor toepassing op land of dat slim kan worden afgestemd met andere nuttige toepassingen van het slib.

Tenslotte zal de omgeving er een aantal jaren behoorlijk anders uit gaan zien. Financieel zullen er afspraken gemaakt moeten worden met de perceeleeigenaren omtrent het gebruik maken van de gronden voor inrichting en exploitatie van een kleirijperij. Hierin dient ook rekening gehouden te worden met de zoutere ondergrond na ontmanteling van de kleirijperij ten opzichte van de nulsituatie. Of dat überhaupt is toegestaan is afhankelijk van de staat van

¹⁷ Het slib uit de slibvang van de Haven van Delfzijl bevatte weinig tot geen zand. De klei van Kleirijperij Delfzijl is geleverd bevatte wel wat zand dat vermoedelijk is meegekomen uit de drainerende zandlaag.

de ondergrond bij de start (wordt bijvoorbeeld de streefwaarde al overschreden), de mate waarin de bodem wordt gewijzigd en het lokale wetgevende kader (bijvoorbeeld lokale maximumwaarden). Het duurt namelijk nog een aantal jaren duren voordat al het zout in de ondergrond is uitgespoeld. Om zout indringing in de ondergrond te verminderen of te voorkomen kan gedacht worden aan het toepassen van een folie in het depot. Het toepassen van een dergelijke mitigerende maatregel is duur en beperkt ook de snelheid van rijpingsproces omdat er geen water via de ondergrond kan verdwijnen. Bovendien is het technisch ingewikkeld om dit over grote oppervlakken te installeren en gaat dit stuk bij het ontgraven van de gerijpte klei. Het toepassen van een folie is dan ook niet aan te bevelen. Naast de perceeleigenaar zijn er andere stakeholders die iets zullen vinden van het kleirijperij-concept op een dergelijke locatie. Op tijd alle stakeholders in kaart brengen, bevragen en de plannen toe te lichten is evident.

B.4 Rijpingsmethodieken

Bij de inrichting van het depot is het essentieel om te denken aan de waterhuishouding. Immers, de focus ligt in beginsel voornamelijk op het ontwateren van het slib. Ook voor het vullen van de depots met slib is het belangrijk dat de vulpunten, route van de persleidingen en locatie van de stortkisten goed zijn uitgedacht. Het slib dat wordt ingebracht heeft idealiter een dichtheid van boven de bezinkdichtheid, tussen de 1.16 en 1.20 t/m³. Dan beperk je de hoeveelheid proceswater, heb je geen bezinking en heb je eigenlijk tijdens het vullen van de depots de stortkisten niet nodig. Bij langere persafstanden is het verpompen van slib met hogere dichtheden lastig en kan er gekozen worden om verdund slib in te brengen. In dat geval heb je veel proceswater nodig dat ook snel weer moet worden afgevoerd door de stortkisten.

De stortkisten zijn ook nodig voor het afvoeren van regenwater. De stortkisten komen uit op de bestaande sloten die om het terrein liggen. Deze sloten kunnen - op binnendijkse locaties - tijdelijk niet op het omliggende poldersysteem aangesloten blijven omdat deze sloten ongetwijfeld zullen verziltten (tenzij zoutgehaltes al vooraf worden gereduceerd). Overtollig zout water moet dan terug naar het mariene estuarium worden vervoerd.

Het enige dat je kan doen is het zoutgehalte te verlagen door het slib te verdunnen met zoet water waardoor de zoutlast snel tot ca. 80% kan worden teruggebracht. Dat komt omdat door verdunnen een laag dichtheidsmengsel ontstaat, dat makkelijk bezinkt, waardoor het bovenliggende water (met zout) snel kan worden afgevoerd. Bij het gebruik van grote hoeveelheden zoet water kan de beschikbaarheid een knelpunt gaan vormen, met name in de zomerperiode. Het is dan ook aan te bevelen om het verdunnen met zoet water uitsluitend te doen in de winterperiode waarbij er sprake is van een neerslagoverschot.

Een zandige ondergrond – in tegenstelling tot een kleiondergrond - versnelt de ontwatering en afvoer van water doordat de afstroomafstand in het verticale vlak bijna halveert; 2-laagse consolidatie. Bij een kleibodem kan een speciaal daarvoor aangebrachte zandlaag met drainage het ontwatering- /consolidatieproces versnellen. Rijping is echter meer dan ontwatering alleen. Het positieve effect van een speciaal aangebrachte zandlaag met drainage neemt af bij afnemende laagdikte. Het advies luidt om ingebrachte sliblagen te hanteren van minder dan 1 meter, hierdoor zal het effect van een drainerende zandlaag hoogstwaarschijnlijk niet opwegen tegen de kosten daarvan. Bovendien zal de zandlaag iedere paar jaar moeten worden aangevuld omdat er altijd zand vermengd wordt met de klei tijdens het omzetten en leeghalen van de depots. Het advies is dan ook om geen zandlaag met drainage toe te passen. De stortkisten kunnen direct aangesloten worden op een pompsysteem dat het zoute water terugpompt naar de Eems-Dollard. Een aparte ringsloot graven is dan ook om deze reden niet nodig. Een aparte ringsloot kan echter ook een functie hebben om geïnfiltreerd zout water uit de ondergrond op te vangen waardoor negatieve uitstralingseffecten voorkomen wordt.

Als er geen drainerende onderlaag wordt aangebracht wordt de waterhuishouding wel extra belangrijk. Als er plassen in het depot staan stopt het rijpingsproces op deze locaties volledig. Rijping gebeurt onder invloed van de atmosfeer (zon, regen, wind, warmte). Rondom de depots zullen perskades het slib in depot houden. Deze perskades moeten niet hoger worden gebouwd dan nodig zodat je goed bij het terrein kan komen met materieel. Regenwater kan uittreden via de stortkisten, en als het slib voldoende aan dichtheid heeft gewonnen en niet meer dicht vloeit heeft het meerwaarde om langs de binnenkant van de perskades kleine greppels te trekken zodat het water goed weg kan stromen.

In het tijdsbestek van het vullen, omzetten en rijpen is niet te verwachten dat er veel begroeiing op het terrein zal komen. Dat geldt zeker voor slib van een zeehaven (zoals uit het Zeehavenkanaal), dat nauwelijks zaden in zich heeft. Voordat er zaden het depot zijn ingewaaid en uitgekomen is de klei alweer een keer omgezet, wat ook de plantengroei verhindert.

Het is in een normale zomer niet mogelijk om het slib dat in de wintermaanden in depot is gebracht en in de zomer is gerijpt vóór het stormseizoen in de dijk te verwerken. Een vraag die mogelijk nog open ligt is wat je met de gerijpte klei gaat doen in de wintermaanden. Het in depot zetten kost geld, maar het laten liggen van de klei vraagt in de volgende lente eerst weer wat tijd om de klei te drogen of nog een keer om te zetten. De klei 1x omzetten is circa 4 maal goedkoper dan om het te verplaatsen en in depot te zetten. Echter als je de klei in de winter laat liggen kun je het depot niet opnieuw vullen.

B.5 Indicatie laagdikte voor optimale rijpingsstrategie

Een optimale rijpingsstrategie is afhankelijk van de doelen die er bij aanvang van het project gesteld worden. Daarnaast kunnen er randvoorwaarden zijn die de keuzes in de rijpingsstrategie beïnvloeden. Is tijd de beperkende factor? Is ruimte de beperkende factor? Hoeveel materiaal is er beschikbaar? De hoeveelheid slib bepaalt uiteindelijk hoeveel klei gemaakt kan worden. Wegen de kosten van de bewerkingen op tegen het eerder beschikbaar hebben van de klei?

Tijd, ruimte en kosten zijn onlosmakelijk aan elkaar verbonden. De laagdikte van het slib volgt uit de hoeveelheid materiaal en de beschikbare ruimte. Bij de rijping is de initiële laagdikte van het slib erg belangrijk. Grofweg geldt hier een kwadratische relatie: een verdubbeling van de initiële hoogte leidt tot een verviervoudiging van de tijdsduur¹⁸. Om het rijpingsproces te versnellen kunnen er bewerkingen uitgevoerd worden (omzetten, op ruggen plaatsen, klei afschrappen etc.).

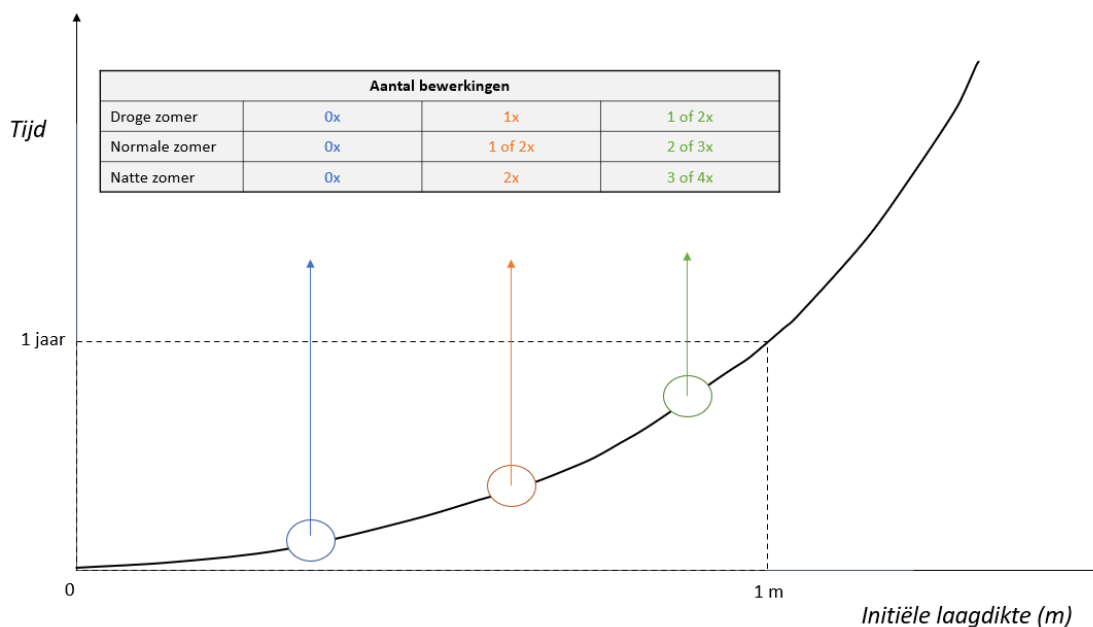
De vraag is op welke wijze er op een effectieve en efficiënte wijze zoveel mogelijk klei geproduceerd kan worden. Op basis van de ervaringen uit de pilot luidt het algemene advies om laagdiktes < 1 m te hanteren voor een kleirijperij. De meest effectieve bewerkingen in de Pilot Kleirijperij vonden plaats op het moment dat de klei plastisch gedrag vertoonde. Gezien de relatief grote laagdiktes gebruikt in de pilot bleek het meest effectief te zijn om op het moment dat de klei voldoende draagkrachtig was te cultiveren en vervolgens de gedroogde korst eraf te schrapen. Laagdiktes > 1 m zijn ook vanuit van het eventueel uitvoeren van bewerkingen niet wenselijk.

Bij een te grote laagdikte wordt omzetten minder effectief. Immers, alleen de bovenste 30 tot 40 cm materiaal zal gaan rijpen. Bij een laagdikte van bijvoorbeeld 200 cm zal een groot deel van het omgezette materiaal nog steeds niet in de bovenste 30 tot 40 cm terecht komen. Die klei is dus voor niks omgezet.

Om inzicht te geven in een optimum zijn hieronder een aantal grafieken weergegeven. In Figuur 24 is voor een initiële laagdikte van ca. 30, 60 en 90 cm weergegeven wat de

¹⁸ Deze relatie geldt bij diffusief transport. Indien steeds wordt omgezet en er dus steeds voldoende materiaal blootligt aan de lucht is dit niet het geval.

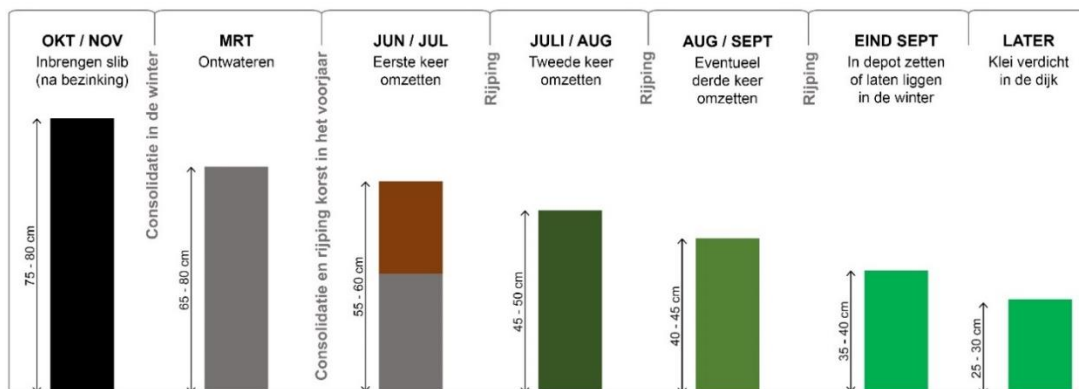
verwachting is met betrekking tot de rijpingsduur en het aantal noodzakelijke bewerkingen om binnen 1 jaar te komen tot gerijpte klei. De grafiek laat zien dat er theoretisch gezien geen bewerkingen nodig zijn bij een dunne sliblaag tot 30 cm, maar hierbij moet worden opgemerkt dat dit na rijping ca. 10 cm klei oplevert dat in de zomerperiode uitdroogt en harde brokken vormt waardoor verwerking in de uiteindelijke toepassing lastiger is. Daarnaast zijn de kosten per m³ voor het 'oogsten' van een dunne laag klei hoger dan bij een dikkere laag i.v.m. de productiesnelheden.



Figuur 24: Laagdikte in relatie tot rijpingstijd voor een laagdikte van ca. 30, 60 en 90 cm. Het aantal bewerkingen om te komen tot gerijpte klei is gebaseerd op een gewenste rijpingsduur van maximaal 1 jaar.

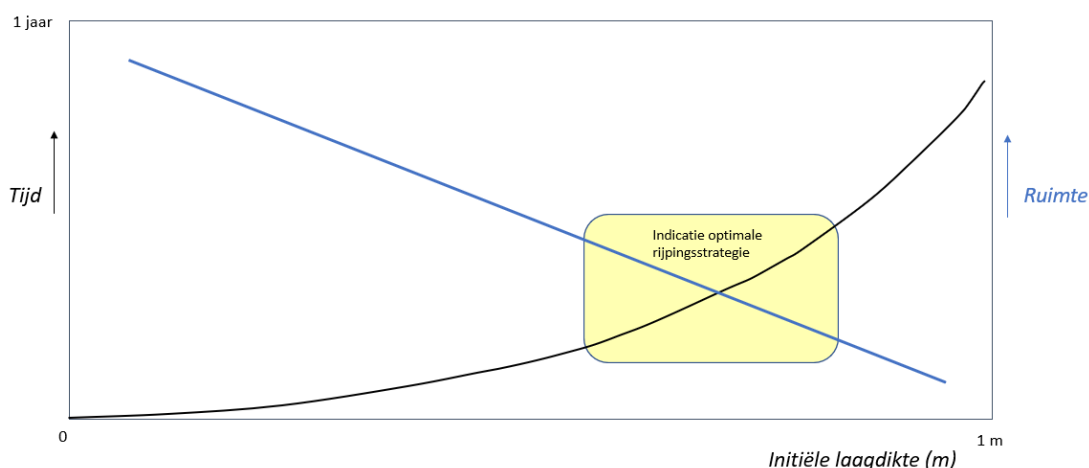
Bij het inbrengen van 75-80 cm aan slib zal er wat eerst consolidatie optreden (ca. 10 cm) en de korst zal gedurende de zomer uitdrogen. Dit kan in een droge warme periode erg snel gaan (bv. 1 maand). Als er veel regen valt kan dit langer duren (bv. 3 maanden). Uiteindelijk zal er bij een laagdikte van 75-80 cm, uitgaande van 1 jaar rijping, altijd moeten worden omgezet. Echter de dikte van de gedroogde en gebarsten korst zal dan ongeveer gelijk zijn aan de dikte van de slappe, iets ingedikte (kwark), sliblaag daar onder. Inschatting is dat met 1 à 2 omzettingsslagen in een droge zomer, 2 à 3 omzettingsslagen in een normale zomer, en 3 à 4 omzettingsslagen in een natte zomer de klei aan het einde van de zomer gereed zou moeten zijn. Er zal altijd minimaal 1 omzettingsslag moeten plaatsvinden.

De verhouding slib ten opzichte van gerijpte en verdichte klei in de dijk is op basis van de gemeten waarden van het materiaal (afkomstig uit het Zeehavenkanaal in Delfzijl) in de Pilot Kleirijperij een factor 3.0 – 3.2. Dat betekent dat voor elke m³ geproduceerde klei, 3.0 tot 3.2 m³ slib nodig is, uitgaande van een slibdichtheid bij aanvang van 1.2 t/m³. Indien bijvoorbeeld in 1 jaar een sliblaag van 75-80 cm gerijpt kan worden, resulteert dit in een terrein productie van ca. 25 cm klei per m² terreinoppervlak per jaar. Een voorbeeld is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 25: Schematische weergave laagdikte in relatie tot het rijpingsproces van 1 jaar.

Over het algemeen kan gesteld worden dat een langere rijpingsduur zorgt voor hogere kosten en dat meer benodigde ruimte ook zorgt voor hogere kosten. Het is daarom van belang om hier een optimum in te zoeken en dit zal projectspecifiek zijn. In Figuur 26 hieronder is op basis van expert judgement een indicatie gegeven om te kiezen voor een laagdikte die een balans is tussen ruimte en tijd en daarmee indirect dus ook in kosten. De range voor een optimale laagdikte ligt op basis van de ervaringen in de Pilot Kleirijperij tussen de 60 en 90 cm. Het is wenselijk dat er in de zomerperiode minimaal één bewerking plaatsvindt om te zorgen dat het materiaal onder de korst ook in contact komt met zuurstof anders vindt hier geen rijping plaats. Zonder het uitvoeren van een bewerking vindt er nog een beetje consolidatie plaats, maar geen rijping. Met de randvoorwaarde om binnen 1 jaar zo efficiënt en zoveel mogelijk klei te produceren zou het ambitieniveau op een laagdikte van minimaal 75 cm moeten liggen.



Figuur 26: Indicatie optimale laagdikte in relatie tot rijpingstijd en ruimte. De aanname is hier dat er zoveel mogelijk klei geproduceerd wordt binnen 1 jaar op basis van 1x vullen van de kleirijperij waarin op basis van expert judgement de risico's (o.a. weersomstandigheden) ook zijn meegewogen.

Als er behoefte is aan grote hoeveelheden klei die jaarlijks gegarandeerd geleverd moeten worden aan een project is het werken met dunnere lagen niet aan te bevelen. Bij het inbrengen van 30 – 40 cm slib zou dit in een half zomerseizoen kunnen rijpen tot klei. Hierbij zouden 2 vulslagen in 1 jaar moeten worden ingebracht waarbij er minder bewerkingen hoeven plaats te vinden. Het werken met dunnere lagen en het 2x vullen per jaar brengt echter wel grote uitvoerings- en planningsrisico's met zich mee. Immers, een nat of een droog voorjaar is niet van tevoren bekend, terwijl de baggerwerkzaamheden niet altijd helemaal flexibel kunnen meebewegen. Er moet eveneens rekening gehouden worden met de uitvoeringstijd om de klei uit het depot te halen, en weer te vullen met slib. Dit zal dan plaatsvinden midden in de zomerperiode waarin er dus geen klei gerijpt wordt. Vanuit dat oogpunt zal 2x vullen en oogsten in 1 seizoen niet de voorkeur hebben, omdat dan mogelijk bij een natte nazomer de 2^e laag niet meer voldoende rijpt. Bovendien is het wenselijk dat de

gerijpte klei ook direct toegepast / verwerkt wordt. Om dit allemaal goed op elkaar te laten afstemmen waarbij het weer ook nog eens een rol speelt is niet realistisch, en brengt grote risico's met extra kosten met zich mee. Voor andere toepassingen zou het rijpen in dunne lagen wellicht wel een goed alternatief kunnen zijn, echter hangt dit af van de projectspecifieke randvoorwaarden (bv. kleinere hoeveelheden, flexibiliteit tussen productie en levering van de klei, beschikbare ruimte, bereidheid betaling kosten per m³ klei etc.)

Voorkeur is daarom om één laagdikte te kiezen die in één zomerseizoen rijpt tot klei, en de wintermaanden te gebruiken om de depots te vullen met slib. Daarnaast geldt dat als het (deels) gerijpte materiaal in de winterperiode blijft liggen dit qua kwaliteit/rijping achteruit zal gaan. Het is dan ook aan te bevelen om geschikte klei in depot te zetten en te zorgen dat weersinvloeden nauwelijks invloed meer hebben op de kwaliteit van het gerijpte materiaal. Het tempo van levering in relatie tot de uitvoering van bijvoorbeeld een dijkversterking is een aandachtspunt. Aan het einde van het rijpingsjaar zou ongeveer bekend moeten zijn hoeveel klei is gerijpt en hoeveel meter dijk er kan worden versterkt in het daaropvolgende jaar.

De eigenschappen van het slib wijzigen sterk tijdens het rijpen. Het is daarom aan te bevelen om een korte rijpingstest te doen (met bijvoorbeeld 50 L materiaal), en vervolgens materiaaleigenschappen (zoals Atterbergse grenzen) te bepalen. Dat maakt ook dat de massabalans en de "volumebalans" beter in te schatten. Daarbij kunnen ook de parameters worden bepaald die gebruikt kunnen worden als input voor een model waardoor de rijping beter voorspeld kan worden. Met de juiste testen op het ingangsmateriaal en daarbij testen op een geringe hoeveelheid gerijpte klei in de beginfase van het project kan een goede inschatting worden gemaakt voor de geschiktheid van het eindproduct voor de gewenste toepassing.

B.6 Kosten

Uiteindelijk zal er aan elke m³ klei een prijskaartje hangen. Dit is afhankelijk van huur van het terrein, transportkosten van het slib en de klei en de kosten voor bewerkingen. De Business Case gaat uitvoerig in op deze aspecten (Fiselier en de Reus 2023).

Waar nog wel over nagedacht kan worden is om de klei wat langer te laten liggen om kosten te besparen op omzetten. De verwachting is dat dit niet iets zal opleveren omdat de terreinhuur waarschijnlijk duurder zal zijn dan de kosten van extra omzetten. Tijd is dus geld in dat opzicht en een korte uitvoeringstijd zal vanuit kosten vaak de voorkeur hebben. De kosten voor het omzetten van de klei ligt rond de 0.50 €/m³, dat is 3,000 €/hectare bij een laagdikte van 60 cm. Dit is de laagdikte na consolidatie en rijping van een 90 cm dikke sliblaag (zie Figuur 25). Voor het bewerken van een dunnere laag met een kraan zullen de kosten per m³ klei hoger zijn aangezien de productiesnelheden lager zijn. Vanuit toekomstige toepassingen is het wenselijk dat het rijpende materiaal in ieder geval één bewerkingsslag krijgt om te zorgen dat het materiaal onder de korst ook aan zuurstof wordt blootgesteld, maar ook om de korst (bestaande uit harde brokken uitgedroogde klei) te breken. Afhankelijk van de gewenste hoeveelheden klei en de uiteindelijke toepassing zal op basis van de kosten, tijd, ruimte en uitvoeringsrisico's een keuze gemaakt worden in de gewenste laagdiktes. Met betrekking tot de kosten voor het produceren van grote hoeveelheden klei is het niet wenselijk om voor dunne lagen te kiezen vanwege de relatief lage productiesnelheden van bewerking en waar eveneens veel ruimtebeslag voor nodig is.

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