



Pilot Kleirijperij

WP4.1.1 Evaluatie historische data

Projectomschrijving: Pilot Kleirijperij
 Contractnummer: 32268
 Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Noord Nederland
 Documentnummer: 4.1.1
 Datum: 23-07-2020
 Versie: v1.0
 Status: Definitief

Revisie

Revisie no.	Revisie Datum	Naam en paraaf eindverantwoordelijke			
		Opsteller	Gecontroleerd	Geautoriseerd	Paraaf
V0.1	02-05-2018	Steven Sjenitzer Wouter van der Star	Petra Dankers Thijs van Kessel	Jannes Boer	
V1.0	23-07-2020	Steven Sjenitzer Wouter van der Star	Petra Dankers Thijs van Kessel	Jannes Boer	

Distributielijst

Distributielijst				
Kopie nr.	Functie	Naam	Revisie	Toelichting bedrijf
	Opdrachtgever	Wim Sterk		
	Opdrachtgever	Hans Ruiter		
	Projectmanager	Jannes Boer		
	Technisch manager	Marcel van den Heuvel		
	Kennismanager	Wouter van der Star		

Contact

Spuiboulevard 210,
 3311 GR Dordrecht
 +31 78 6111 099
info@ecoshape.nl
www.ecoshape.nl

RAPPORT

Historisch (literatuur) onderzoek Pilot Kleirijperij

Literatuurstudie, werkpakket 4.1.1

Klant: EcoShape

Referentie: WATRC_BC8760-111_R0001_901691_f1.0

Versie: 1.0/Definitief

Datum: 23 juli 2020



HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX AMERSFOORT
Netherlands
Water
Trade register number: 56515154

+31 88 348 20 00 **T**
+31 33 463 36 52 **F**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Historisch (literatuur) onderzoek Pilot Kleirijperij

Ondertitel: Literatuurstudie kleirijperij
Referentie: WATRC_BC8760-111_R0001_901691_f1.0
Versie: 1.0/Definitief
Datum: 23 juli 2020
Projectnaam: Kleirijperij
Projectnummer: BC8760-111
Auteur(s): Steven Sjenitzer, Dorien Derks, Wouter van der Star, Ebi Meshkati Shahmirzadi

Opgesteld door: Steven Sjenitzer, Wouter van der Star

Gecontroleerd door: Petra Dankers, Thijs van Kessel

Datum/Initialen: 23 juli 2020

Goedgekeurd door: Petra Dankers

Datum/Initialen: 23 juli 2020

Classificatie

Project gerelateerd



Disclaimer

No part of these specifications/printed matter may be reproduced and/or published by print, photocopy, microfilm or by any other means, without the prior written permission of HaskoningDHV Nederland B.V.; nor may they be used, without such permission, for any purposes other than that for which they were produced. HaskoningDHV Nederland B.V. accepts no responsibility or liability for these specifications/printed matter to any party other than the persons by whom it was commissioned and as concluded under that Appointment. The integrated QHSE management system of HaskoningDHV Nederland B.V. has been certified in accordance with ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 and OHSAS 18001:2007.

Inhoud

1	Samenvatting	1
2	Inleiding	2
2.1	Technische randvoorwaarden	4
2.2	Opzet	5
2.3	Leeswijzer	5
3	Mechanismes en karakterisering	6
3.1	Consolidatie en rijping	6
3.2	Erosieklasse	11
3.3	Consistentieindex	13
3.4	Organische stof	13
3.5	Zoutgehalte	14
4	Praktijk	17
4.1	Keuze van praktijkcases	17
4.2	Aanleg Afsluitdijk Lauwerszee (Lauwersmeerdijk)	23
4.3	IJsselmeerpolders	26
4.4	Euroklei	30
4.5	DredgDikes	36
4.6	Slufter (Haven Rotterdam)	39
4.7	Dijkmateriaal uit baggerspecie, Haven van Hamburg	43
4.8	Interessante projecten met beperkte informatie	46
5	Discussie en conclusies	53
5.1	Relatie tussen cases en de kleirijperij	53
5.2	Kansrijke rijpingsstrategieën	54
5.3	Toepassing in dijken	55
5.4	Leerpunten voor de klijrijperij	55
5.5	Kennishiaten	56
5.6	Proces	58
6	Literatuurlijst	59
	Overzicht figuren en tabellen	67

1 Samenvatting

Het Eems-Dollard estuarium kampt met zeer hoge concentraties slib die leiden tot negatieve effecten voor de ecologie. Dit slib bezinkt o.a. in de haven van Delfzijl en de polder bij Breebaart en is daar overtollig. Tegelijkertijd is in dit gebied een grote behoefte aan klei ten behoeve van dijkversterking. De centrale vraag voor de Kleirijperij is "hoe kan het gebaggerde slib uit Delfzijl en Breebaart worden omgevormd tot bruikbare klei?". Er worden proefvelden aangelegd waarop het gebaggerde slib (met een hoog watergehalte) wordt gedeponeerd. Hier kan het materiaal sedimenteren (bezinken) en consolideren (compacteren). Het uittredende poriewater stroomt af d.m.v. peilbeheer. De waterflux t.g.v. consolidatie neemt af in de tijd en zodra deze kleiner wordt dan de verdampingsflux, wordt dit de aandrijvende kracht en start de rijpingsfase. Het watergehalte van de bodem neemt hierbij geleidelijk steeds verder af en uiteindelijk wordt klei gewonnen. De kleirijperij is een pilot studie waarbij verschillende technieken worden getest om; het slib te baggeren, te laten rijpen (drogen), de kwaliteit van de gewonnen klei te verbeteren.

Het project Kleirijperij is één van de Eems-Dollard-projecten binnen het programma Eems-Dollard 2050. De projecten zijn er op gericht om natuurlijke processen te benutten om te komen tot nuttige toepassingen voor het overtollige slib.

Dit document beschrijft het historisch (literatuur)onderzoek waarin gekeken wordt 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.

Uit deze cases komt het beeld naar voren dat in enkele jaren, met een laagdikte van maximaal 1-2 meter klei kan worden gemaakt. De lokale karakteristieken bepalen of dat ook daadwerkelijk het geval is. Het organisch gehalte (waarvoor een maximumwaarde geldt voor toepassing in dijken) neemt naar verwachting sterk af tijdens de rijping, wat een effect heeft op de kleikarakteristieke Atterbergse grenzen. Ze leiden er echter niet toe dat het materiaal een andere erosieklasse heeft, 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.

Wanneer bezinking en consolidatie (effecten van indikken van het slib onder verzadigde omstandigheden) overgaat in rijping (onverzadigde omstandigheden), begint ook de oxidatie van organisch materiaal, en zullen kripscheuren ontstaan. Drainage met greppels (aanvankelijk) en op ruggen zetten (later) van het materiaal is dan een bewezen methode om tot goede klei te komen.

Er bestaan een aantal kennishiaten over het proces dat in de Pilot Kleirijperij wordt doorlopen. Deze zijn sterker aanwezig in het rijpingsproces dan in het consolidatieproces en worden in belangrijke mate veroorzaakt door het complexe samenspel van (bio)chemische processen en fysische processen. Daarmee is de precieze rijpingsduur moeilijk te voorspellen op basis van literatuurgegevens.

2 Inleiding

De Eems-Dollard wordt gekenmerkt door een hoog slibgehalte en daardoor een verminderde ecologische waarde. In 2015 is voorgesteld dat de structurele jaarlijkse verwijdering van 1 miljoen ton slib (op basis van droge stof (ds)) uit het systeem een positief effect zou hebben op de ecologie [50]. Deze winning 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 methoden is de Pilot Kleirijperij. In deze pilot wordt slib uit de Eems-Dollard in 3 jaar tijd gerijpt en omgezet in dijkklei. De klei zal worden toegepast in een dijkversterking (de Brede Groene Dijk), en –gedeeltelijk- als ophoogmateriaal worden ingezet.

Deze pilot wordt uitgevoerd door Rijkswaterstaat, het Groninger Landschap, Groningen Seaports, Rijkswaterstaat Noord Nederland, Waterschap Hunze en Aa's en stichting Ecoshape en het is mede-gefinancierd door het Waddenfonds.

De pilot wordt uitgevoerd met twee slibbronnen uit de Eems-Dollard (de haven van Delfzijl en de polder Breebaart) en ligt op twee locaties: Kleirijperij Delfzijl ligt binnendijs direct naast het havenkanaal, terwijl de Kleirijperij Kwelder buitendijs ligt op de kwelder, direct voor de locatie waar het materiaal zal worden toegepast in een dijkversterking (Figuur 1).



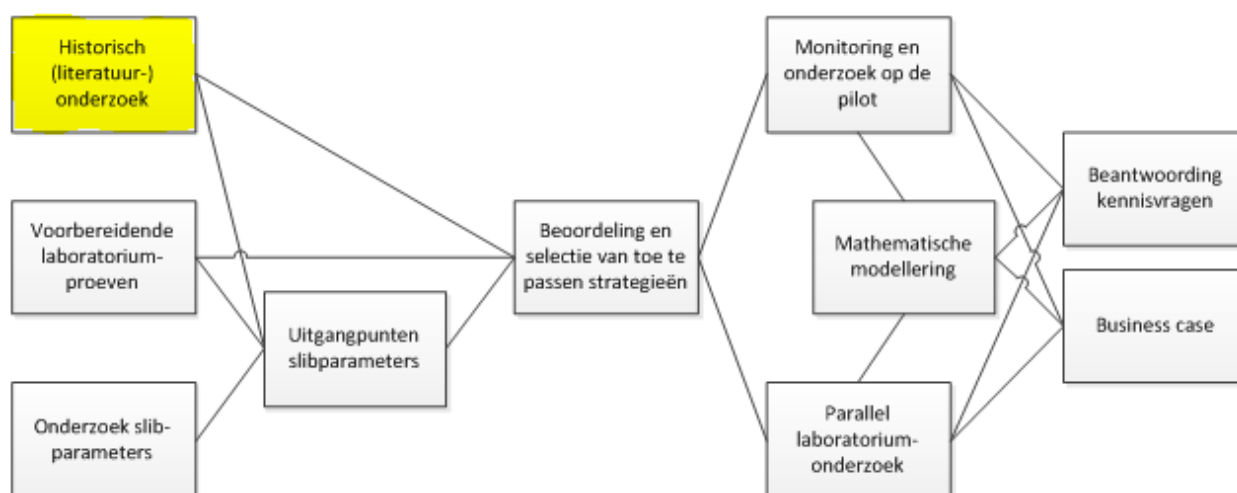
Figuur 1: Locatie van de kleirijperij en de slibbronnen

Beide kleirijperijen zijn verdeeld in proefvakken (15 in Kleirijperij Delfzijl, 10 in Kleirijperij Kwelder) waarin verschillende rijpingsmethodes kunnen worden beproefd. Het doel van de kleirijperij is daarbij tweeledig:

- Kennis opdoen om klei van slib maken voor opschaling onder optimale condities (en beoordelen of dat haalbaar is);
- Het leveren van voldoende geschikte dijkklei (70 000 m³) voor de Pilot Brede Groene Dijk.

Om optimaal te kunnen kiezen welke bewerkingsmethodes en parameters relevant zijn, is voorbereidend laboratoriumonderzoek naar het consolidatiegedrag uitgevoerd [95], zijn de eigenschappen van het slib op beide winlocaties bepaald [96] en is onderhavig literatuuronderzoek uitgevoerd. Het doel van het onderzoek is het in kaart brengen van de kennis die al beschikbaar is op gebied van het rijpen van klei op basis van Case Studies op een manier die vergelijkbaar is met de kleirijperij en op basis daarvan lessen te trekken voor de uitvoering en blinde vlekken te benoemen.

Een overzicht hoe het onderzoek past binnen de overige kleirijperij-activiteiten is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2: Relatie tussen de verschillende onderdelen van de Pilot Kleirijperij

Het doel van deze rapportage is om de kennis te verzamelen uit historische projecten die relevant zijn voor de uitvoering van de kleirijperij. De kleirijperij is immers niet de eerste keer dat zout slib nuttig wordt toegepast, en ook niet de eerste keer dat het in dijken wordt toegepast. Met de opgedane kennis kunnen:

- de verwachtingen over het rijpingsproces worden aangescherpt;
- de processen beter worden gestuurd;
- blinde vlekken (die een plek moeten krijgen binnen het onderzoek) scherper worden gedefinieerd.

2.1 Technische randvoorwaarden

Voor de kleirijperij ligt het startpunt (slib uit de Eems-Dollard) en het eindpunt (dijkenklei) bij voorbaat vast. Het is juist de route die gevolgd moet worden om van de ene naar de andere situatie te komen waar de vragen liggen. In dit historische literatuuronderzoek is gekeken naar welke factoren een rol spelen bij de transitie van het startpunt naar dit ijkpunt. Daarvoor is het nodig beiden in meer detail te bekijken.

Het uitgangsmateriaal is slib in een marien (en dus zout) milieu, met een relatief hoog gehalte aan organische stof, en een bijzonder laag zandgehalte. Van dit uitgangsmateriaal is bekend dat het slecht consolideert. De index-eigenschappen van het slib die als uitgangspunt zijn genomen voor deze studie zijn in Tabel 1 weergegeven. Voor het slib uit polder Breebaart geldt nog wel dat het materiaal met een cutter gewonnen wordt en vervolgens verpompt, waardoor het watergehalte bij het in depot brengen flink hoger is dan in situ. Bij het baggeren en verpompen van het slib in de haven van Delfzijl wordt geen perswater gebruikt.

Tabel 1: Parameters van het uitgangsmateriaal in de haven van Delfzijl (boven) en de polder Breebaart (onder):

Parameter		Eenheid	Minimum	Maximum	Gemiddeld
Lutumgehalte (% < 2µm)		[%]	38,7	44,4	41
Zandgehalte (% > 63µm)		[%]	0,5	1,7	1
Atterbergse grenzen	Uitrolgrens	[%]	51	57	55
	Vloeigrens	[%]	136	183	150
	Plasticiteits Index	[%]	80	126	95
Situ dichtheid		[t/m ³]	1,17	1,27	1,22
Gehalte organische stof		[%]	4,5	11,4	8,7

Parameter		Eenheid	Minimum	Maximum	Gemiddeld
Lutumgehalte (% < 2µm)		[%]	27	53	37
Zandgehalte (% > 63µm)		[%]	4	30	13
Atterbergse grenzen	Uitrolgrens	[%]	28	53	40
	Vloeigrens	[%]	68	151	97
	Plasticiteits Index	[%]	40	98	57
Situ dichtheid		[t/m ³]	1,20	1,60	1,36
Gehalte organische stof		[%]	4,2	10,4	7,7

Deze waarden komen overeen met eerdere geotechnische classificaties van Eems-Dollard-slib (voor zover beschikbaar). De organische stof bestaat in het Eems-Dollard-estuarium voornamelijk uit microphytobenthos (een groepering van diverse marine algen) en zogenoemde Yellow Substances (CDOM, coloured organic material) wat voornamelijk weer bestaat uit humuszure bestanddelen [99].

De klei dient uiteindelijk te voldoen aan de eisen gesteld in de rapportage Klei voor Dijken [60] en beschreven in het Projectplan Kleirijperij (2015):

1. **De gerijpte klei moet minimaal voldoen aan erosieklasse II of I. Voor erosieklasse II betekent dat: ligging boven de zogenaamde A-lijn.**
2. **De gerijpte klei dient een consistentie-index te hebben van minimaal 0,6.**
3. Afkomstig van een op natuurlijke wijze afgezet materiaal.
4. Zandgehalte (> 63 µm) is maximaal 40%.
5. **Minder dan 5% organisch materiaal volgens de waterstofperoxidebehandeling methode.**
6. Minder dan 25% gewichtsverlies bij de HCl-behandeling (kalkgehalte).
7. **Zoutgehalte (NaCl g/l bodemvocht) is minder dan 4%.**
8. Geen significante bijmenging van puin, grind en dergelijke.
9. Weinig heldere (rode, bruine en gele, soms blauwe) verkleuringen.

Gezien de eigenschappen van in de situ genomen slibmonsters [96], is de verwachting dat de punten 4, 6, 8 en 9 zonder verdere behandeling worden gehaald.

De mate waarin criterium 3 wordt gehaald (natuurlijk afgezet) is in deze pilot niet aan de orde: hoewel de kleivorming natuurlijk is, is het inbrengen van het slib wellicht niet zo te kwalificeren. Overigens wordt ook niet-natuurlijk afgezette klei als mogelijk geschikte klei gedefinieerd in de rapportage Klei voor Dijken, waarbij wordt aangetekend dat daarbij extra aandacht dient te worden besteed aan milieuhygiënische eigenschappen [60].

De nadruk ligt in deze literatuurstudie (en in de kleirijperij in algemene zin) daarom op de ontwikkeling van de –vetgedrukte– parameters 1, 2, 5 en 7.

2.2 Opzet

- Op basis van de initiële parameters van het slib, en de eisen waaraan de klei uiteindelijk moet voldoen kunnen de doelen voor de kleirijperij als volgt worden samengevat: Verwijderen van water;
- Verwijderen van zout;
- Afbraak van organisch materiaal;
- Verkrijgen van erosiebestendige eigenschappen.

Het literatuuronderzoek is dan ook gericht op de beschikbare informatie over deze processen en is opgebouwd uit twee hoofdonderdelen:

- een beschrijving van de mechanismes die een rol spelen bij consolidatie en rijping en
- een beschrijving van de voor de transitie relevante case studies.

Het literatuuronderzoek is gericht op praktijkonderzoek gericht op casestudies en niet bedoeld om een overzicht te geven van de recente wetenschappelijke literatuur met betrekking tot de rijping van grond.

2.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 3 worden de mechanismes in het proces van slib tot klei beschreven en de relaties met zout en organische stof. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 een groot aantal casestudies en op relevantie gekwalificeerd op basis van een vijftal beoordelingscriteria. Op grond van deze criteria is een vijftal case studies geselecteerd voor uitgebreidere analyse. Op basis van de case studies en het literatuuronderzoek worden in hoofdstuk 5 conclusies en leerpunten geformuleerd en witte vlekken geïdentificeerd.

3 Mechanismes en karakterisering

In dit hoofdstuk worden de mechanismes geschetst die een rol spelen bij de omzetting van slib tot geschikte klei. Daarbij wordt de nadruk gelegd op de voor de kleirijperij relevante sturingsparameters. Het gaat dan om de volgende eisen (waarbij de relevante parameters vet zijn weergegeven):

1. De gerijpte klei moet minimaal voldoen aan **erosieklasse II** of I. Voor erosieklasse II betekent dat: ligging boven de zogenaamde A-lijn.
2. De gerijpte klei dient een **consistentie-index** te hebben van minimaal 0,6.
5. Minder dan 5% **organisch materiaal** volgens de waterstofperoxidebehandeling methode.
7. **Zoutgehalte** (NaCl g/l bodemvocht) is minder dan 4%.

In de volgende paragrafen worden deze sturingsparameters beschreven in relatie tot het uitgangsmateriaal en het verwachte gedrag gedurende rijping.

Omdat het voor het begrip belangrijk is, wordt eerst kort ingegaan op de hoofdprocessen die samenhangen met consolidatie en rijping en worden de karakteristieken van scheurvorming en de (historische vaak gebruikte) rijpingsgraad n beschreven.

3.1 Consolidatie en rijping

In het proces van slib tot klei worden over het algemeen 2 fases geïdentificeerd: consolidatie en rijping. Consolidatie is daarbij het initiële proces waarbij slibdeeltjes als gevolg van hun eigen gewicht of bovenbelasting compacteren, waardoor water uittreedt. Rijping is het proces waarbij water uittreedt als gevolg van verdamping bij direct contact met de lucht. Hierbij wijzigt de samenstelling van de klei als gevolg van (bio)chemische reacties (oxidatie).

De overgang wordt meestal bepaald bij droogval: het moment waarop de watertoestroming als gevolg van consolidatie lager is dan als gevolg van verdamping. Deze overgang is dan ook geen stofeigenschap: hoewel ze mede bepaald wordt door de ontwikkeling van de consolidatie, spelen ook verdamping (en daarmee wind, temperatuur en zoninstraling), bewerking (zoals afwateringsmogelijkheden) en laagdikte een rol.

Hoewel de overgang van consolidatie naar rijping daarmee relatief scherp is aan te wijzen, is het onderscheid zelf uiteraard enigszins relatief: ook na droogvallen zullen de bij consolidatie relevante omzettingen een rol spelen, en de typische rijpingsactiviteiten zullen (in zeer beperkte mate) ook in de consolidatiefase een rol kunnen spelen.

3.1.1 Bezinking

Er is veel bekend over het bezinkingsgedrag van slibdeeltjes in relatief lage concentraties. Dit systeem is echter fundamenteel anders dan slibgedrag in hoge concentraties, die relevant is voor de kleirijperij¹. In dergelijke systemen vindt aanvankelijk een fase van hindered settling plaats [100] die niet zozeer beschreven wordt door enkele deeltjes (met beperkte interactie met elkaar) die naar de bodem zinken, maar waar juist deze interactie van belang is.² Bij zeer fijne deeltjes is de bezinktijd lang genoeg om interacties mogelijk te maken zoals flocculatie die het bezinkproces bevorderen. In deze vloeistof fase is er nog geen sprake van korrelcontacten, de deeltjes zijn nog in suspensie, maar er is wel sprake van dynamische wateroverspanningen.

¹ Daarin wordt immers uitgegaan van het verkrijgen van een uitgangsmateriaal van een hoge dichtheid.

² De mathematische beschrijving van de processen en hun samenhang is geen onderwerp van dit literatuuronderzoek, maar komt aan de orde bij het werkpakket mathematische modellering (wp 4.3.1: beschrijving modelleringsmethode)

De (hindered) settling fase eindigt wanneer de deeltjes wegens geometrische beperkingen niet verder kunnen uitzakken (gelling concentratie). Op dat moment worden de deeltjes nog wel door het water gedragen en is de korrelspanning nog nul. Hierna begint de consolidatiefase.

3.1.2 Consolidatie

Vanaf dat moment kunnen we spreken van 'grond' en niet meer van baggerslib als een vloeibare slurry of mengsel. Verdere verdichting kan vervolgens optreden onder invloed van het eigen gewicht of een aangebrachte belasting (capping). Dit proces heet consolidatie.

Terzaghi, de grondlegger van de moderne geotechniek, introduceerde het concept van korrelspanning (effective stress), zijnde de totale grondspanning verminderd met de poriënwaterspanning. Op basis van dit concept beschreef hij voor het eerst de consolidatie van klei [112]. In Nederland is de hydrodynamische zettingstheorie van Terzaghi geïntroduceerd door Keveling Buisman [113]. De theorie is uitgebreid door Gibson [121] voor consolidatie startend bij een zeer lage dichtheid, waarbij de porositeit en doorlatendheid sterk kan variëren in de verticaal en in de tijd. Merckelbach en Kranenburg [120] hebben vervolgens een relatie afgeleid voor het verband tussen doorlatendheid en poriëngetal (en het verband tussen effectieve spanning en poriëngetal) gebaseerd op het concept van fractalen. Hiermee kunnen de parameters voor de wiskundige beschrijving van de consolidatie van slib en slappe klei worden bepaald op basis van relatief eenvoudige kolomproeven.

Wordt een kleilaag op een zeker moment belast, waarbij de totale grondspanning verhoogd wordt, dan zal in eerste instantie deze belasting geheel gedragen worden door het poriënwater, omdat water vrijwel onsamendrukbaar is. De verhoogde poriënwateroverdruk brengt een grondwaterstroming op gang. Door uitstroming van poriënwater (drainage) wordt het korrelskelet belast en vindt samendrukking, ontwatering en verdichting plaats, net zolang totdat de wateroverspanningen geheel verdwenen zijn. De snelheid van dit proces hangt af van de belasting, de samendrukbaarheid en de doorlatendheid van het materiaal en de dikte van de lagen.

Terwijl de uitstroming van het baggerslib in enkele minuten plaatsvindt en de bezinking in enkele uren of dagen treedt consolidatie pas op in een tijdsbestek van weken tot maanden. Bij consolidatie van baggerslib in een depot bestaat de belasting uit alleen het eigen gewicht. Aanwezigheid van zand in het mengsel verhoogt het eigen gewicht. Indien na volledige bezinking de waterstand in het depot wordt verlaagd, wordt daarmee ook het eigen gewicht verhoogd. De doorlatendheid kan verhoogd worden door het aanbrengen van sleuven of horizontale of verticale drainage (zandpalen), zoals o.m. in de wegenbouw toegepast.

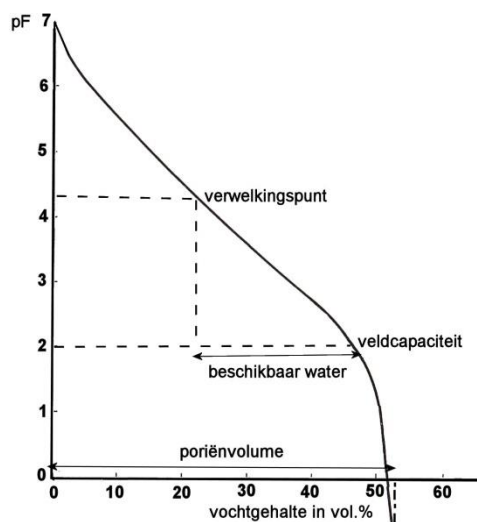
Nadat voldoende consolidatie en drainage heeft plaatsgevonden en het materiaal verder kan drogen en lucht kan indringen, kan de volgende fase van het proces plaatsvinden, de rijping.

3.1.3 Rijping

Droogval is het moment waarop de verdampingsflux groter is dan de waterflux als gevolg van consolidatie naar de bovenkant van het slib. Het moment waarop dit optreedt, betekent niet dat het consolidatieproces stopt, maar dat een aantal aan rijping gerelateerde processen gaat op treden.

Bij droogval wordt de grond onverzadigd. Dit betekent niet dat in de toplaag alle water verdwijnt, omdat door capillaire krachten en binding van water aan organisch materiaal en slib/klei-deeltjes het water gedeeltelijk wordt vastgehouden. De onderdruk die optreedt in het slib als gevolg van verdamping bepaalt welke fractie van de porie-ruimte onverzadigd raakt. De relatie tussen onverzadiging en de aangelegde onderdruk is materiaalspecifiek en wordt vaak beschreven met de waterretentiecurve.

Hierbij wordt het vochtgehalte (in volume %) als functie van de druk (in centimeters waterdruk, op logaritmische schaal) weergegeven (zie bijvoorbeeld [110]). De curve wordt vaak gebruikt in de landbouwkunde, omdat zij ook sterk bepaalt in welke mate planten in staat zijn aanwezig water op te nemen. Een voorbeeld van deze curve is hieronder weergegeven:



Figuur 3: Voorbeeld van een waterretentiecurve (figuur van Wikimedia Commons)

In slib leidt het moment van droogval tot zodanige krimp, dat dit niet meer volledig door consolidatie (verticaal) kan worden opgevangen. Dit leidt tot de vorming van krimp-scheuren (paragraaf 3.1.4), die ertoe leiden dat ook op grotere diepte verdamping en wateruittrekking kan plaatsvinden, wat het drogingsproces versterkt. De rijping leidt ook tot versterking van de oxidatie van organisch materiaal met behulp van zuurstof uit de lucht (zie ook paragraaf 3.4).

Uiteindelijk zal er naast fysische en (bio)chemische rijping ook een microbiële populatie vormen die van belang is voor diverse bodemfuncties (zoals gewasgroei). Deze ontwikkeling vormt geen onderdeel van deze studie.

De n-factor (ook wel n-waarde of rijpingsfactor genoemd) werd in Nederlandse literatuur vaak gebruikt als een maat voor de rijping, geïntroduceerd door Pons en Zonneveld [54]. De waarde geeft het watergehalte aan ten opzichte van de lutumfractie van de grond [47] en wordt beschreven als:

$$n = \frac{W - p[100 - L - H]}{L + bH}$$

Waarin:

- b verhouding waterbindend vermogen per g organische stof en waterbindend vermogen per g lutum. Voor baggerspecie: 3,0 [103].
- p g vocht gebonden aan 1 gram "niet-colloïdaal materiaal" (droge grond, zonder lutum en zonder organische stof). Voor baggerspecie: 0,3 [103].
- L gewichtspercentage lutum, betrokken op de droge stof
- H gewichtspercentage organische stof, betrokken op de droge stof
- W watergehalte

De waarde van de n-factor wordt door Pons en Zonneveld [54] als volgt gerelateerd aan rijping en aan een de consistentie-eigenschappen:

Tabel 2: Aanduiding van het rijpingsstadium op basis van de n-factor

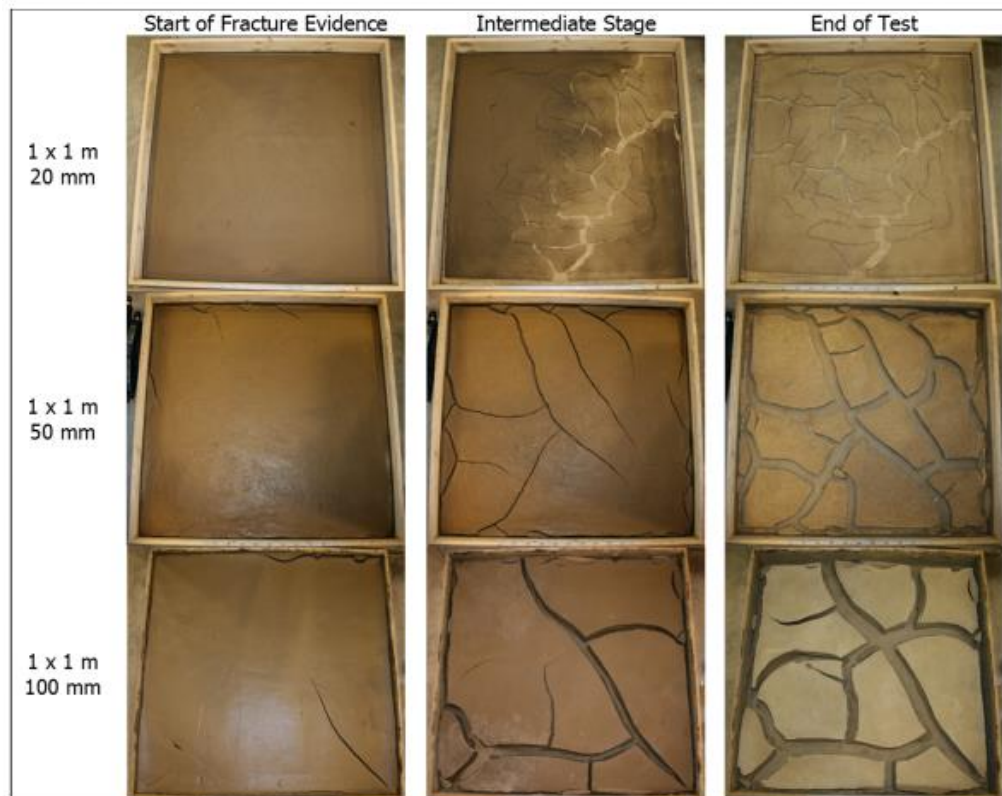
n-factor	aanduiding	beschrijving van de consistentie
< 0.7	gerijpt	stijf, kleeft niet aan de handen en kan niet tussen de vingers doorgeperst worden
0.7-1.0	vrijwel gerijpt	tamelijk stijf, kleeft enigszins aan de handen en kan niet gemakkelijk tussen de vingers doorgeperst worden
1.0-1.4	half gerijpt	tamelijk slap, kleeft aan de handen en kan gemakkelijk tussen de vingers doorgeperst worden
1.4-2.0	vrijwel ongerijpt	slap, kleeft sterk aan de handen en kan zeer gemakkelijk tussen de vingers doorgeperst worden
> 2.0	ongერიpt	zeer slap, loopt vrijwel tussen de vingers door

Op deze relatie zijn veel varianten mogelijk, meestal omdat –voor een bepaald type grond– een aantal factoren vaak als constant worden verondersteld. Waar in de case studies dan ook de n-factor wordt genoemd is de gebruikte relatie er steeds bij vermeld.

Rijniersce [94] heeft deze factor uitgebreid om ook het effect van zuigspanning mee te nemen en heeft deze de m-factor genoemd. Deze m-factor wordt door Rijnierse gekoppeld aan de scheurdiepte.

3.1.4 Scheurvorming en bewerking

Scheurvorming is een proces dat plaatsvindt in drogende klei, wanneer krimp niet meer uitsluitend wordt opgevangen door verlaging van de slibhoogte en scheuren ontstaan [101]. Wat voor type scheuren ontstaan, hangt af van de drogingsnelheid en het grondtype [98].



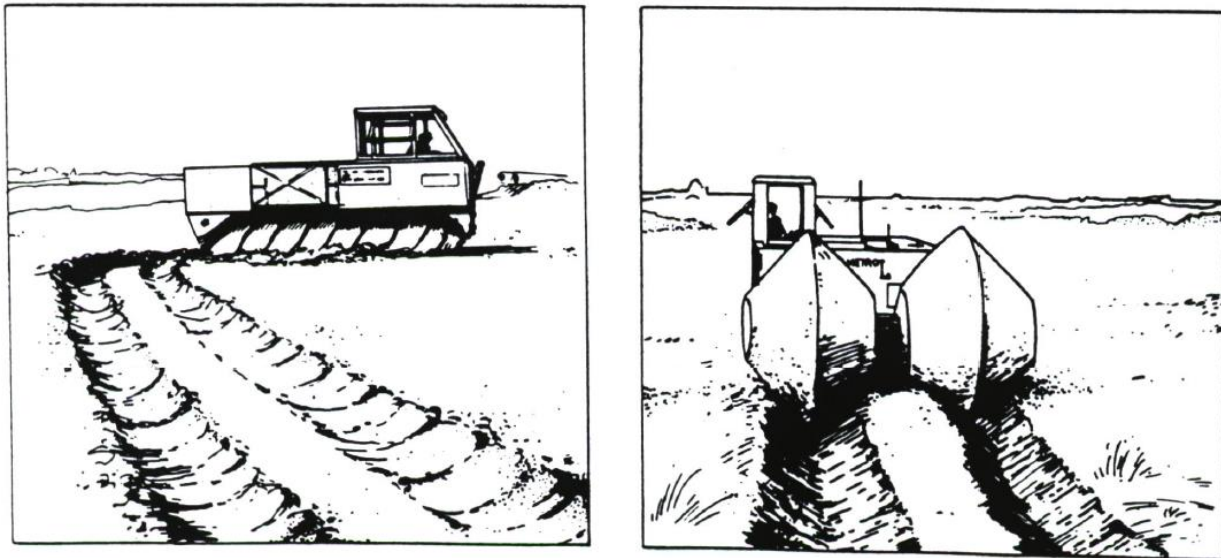
Figuur 4: Scheurvorming in klei in het laboratorium als functie van de laagdikte [101]

Of scheurvorming als positief of negatief wordt gezien, is bij de rijping van klei hangt sterk af van het rijpingsstadium: tijdens de rijping is scheurvorming positief, aangezien het zorgt voor drainage van water, en voor indringing van zuurstof ten behoeve van oxidatie. Dit is des te belangrijker in dit stadium, omdat door compactie en door de onverzadigdheid (en door mogelijke korstvorming) de doorlatendheid, en daarmee het water afvoerende vermogen afneemt. De maximale laagdikte waarbij succesvolle rijping mogelijk is, hangt mede samen met de maximale scheurdiepte en de stabiliteit van scheuren.

Wanneer klei wordt toegepast in een dijk is scheurvorming ongewenst, omdat het de sterkte van de dijk als geheel (macrostabiliteit) negatief beïnvloed, en ook de vorming van een aaneengesloten grasmatt bemoeilijkt, wat een negatief effect heeft op erosiebestendigheid.

Bij de vorming van scheuren wordt vaak uitgegaan van “sequential infilling”, waarbij wordt aangenomen dat scheuren in verschillende stadia (“generaties”) ontstaan, waardoor het oppervlak steeds verder wordt opgevuld [117].

Het effect van scheurvorming om water en zout af te voeren, en daarmee het rijpingsproces te initiëren en te versnellen wordt versterkt door drainagemaatregelen, zowel aan de onderkant als aan de bovenkant van het depot. Bij bewerking aan de bovenkant is in de beginfase de beperkte draagkracht een probleem: de meeste machines zakken door de sliblaag heen. Daarom zijn machines ontwikkeld die in die eerste fase toch de mogelijkheid van ploegen/voren trekken mogelijk maken, zoals discusswielen en de amfirol [38].



Figuur 3: Bewerking van slibvelden, wanneer de sterkte nog beperkt is: amfirol (links) en discuswielen (rechts) [38].

Wanneer de begaanbaarheid is verbeterd is minder specialistisch materieel nodig. Vaak wordt, zodra het mogelijk is, de klei omgewerkt en “op ruggen gezet”, waardoor de rijping wordt versneld [47].

3.2 Erosieklasse

Voor dijkklei bestaan erosiebestendigheidseisen die afhangen van de locatie waar ze worden toegepast: voor de toplaag (waar erosie een zeer belangrijke rol speelt) is een hogere erosiebestendigheid vereist dan in de binnenkern. De erosieklasse wordt in Nederland bepaald op basis van de Atterbergse Grenzen, die op hun beurt afhankelijk zijn van mineralogische samenstelling van de klei en organische stofgehalte. In deze paragraaf wordt daarom eerst de klasse-indeling besproken, en vervolgens waar deze van afhankelijk is.³

3.2.1 Klassenindeling

De Atterbergse grenzen worden gebruikt in de classificatie van klei en bestaan uit een tweetal watergehalten:

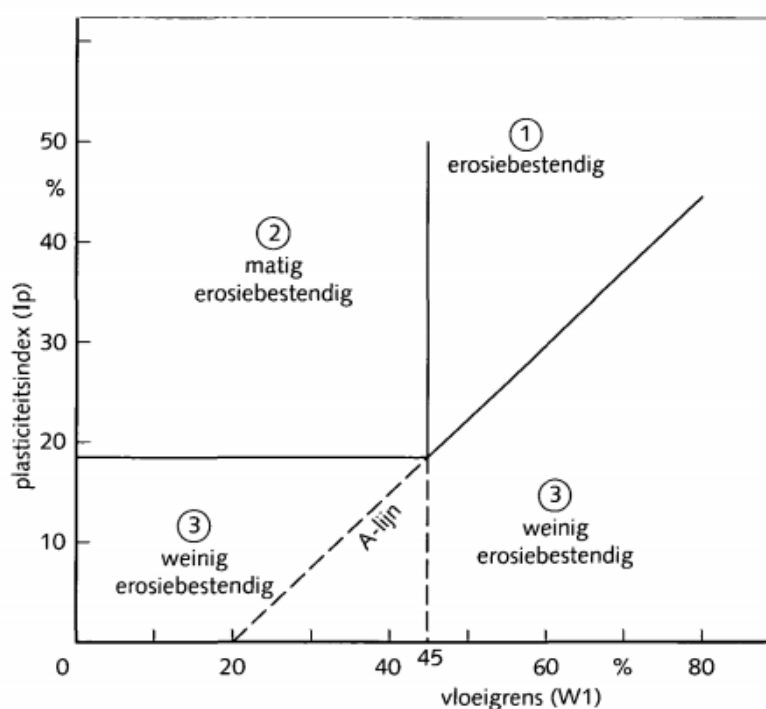
- De vloeigrens: het watergehalte waarbij de klei gaat “vloeien” en zich als een vloeistof gedraagt.
 - De (uit)rolgrens het watergehalte waarbij het nog net mogelijk is om een rolletje te rollen.
- Tussen vloeigrens en rolgrens is het materiaal te beschouwen als een plastisch materiaal dat over een grote range daarvan een hydrologische functie kan vervullen. Indien dit verschil (plasticiteitsindex genoemd: PI, of Ip) groot is, wordt van een plastische klei gesproken.

³ De relatie met kleimineralogie wordt besproken op het kopje “zoutgehalte”, omdat de observaties daar tevens op jun plek zijn.

Bij de bepaling van de Erosieklasse worden in Nederland de Atterbergse grenzen gehanteerd.⁴, waarbij de volgende definities worden toegepast [60]:

Erosieklasse	Vloeigrens (w_l) [%]	Plasticiteitsindex [%]	Zandgehalte [%]
1	>45	>0,73 (w_l-20)	<40
2	<45	>18	<40
3	-	<18 [bij $w_l < 45$] of <0,73 (w_l-20) [bij $w_l > 45$]	>40

Grafisch wordt deze klasseindeling vaak als volgt weergegeven:



Figuur 6: Erosiebestendigheid van klei als functie van de vloeigrens en plasticiteitsindex

De lijn tussen klasse 1 en 3 wordt de A-lijn genoemd, die voor het eerst door Casagrande is voorgesteld voor classificatie van klei (maar niet direct voor erosiebestendigheid) [106].

Uit de rapportage Kwaliteitsplan Parameters Slib [96] volgt dat het Eems-Dollard slib dat gebruikt wordt voor de Kleirijperij een zodanig laag zand gehalte heeft dat aan de eis dat het zandgehalte minder dan 40% moet bedragen makkelijk wordt voldaan. Bovendien leidt de hoge vloeigrens ertoe dat erosieklasse 2 ook niet makkelijk bereikt zal worden, waardoor het rijpingsdoel gesteld moet worden op klasse 1.

⁴ In de rapportage "Onderzoek van kleibekleding van dijken langs IJssel en Pannerdens Kanaal voor het ontwikkelen van keuringseisen voor klei" [105] wordt geconcludeerd dat "De correlatie van Atterbergse grenzen met eigenschappen als doorlatendheid en erosiegevoeligheid van bekledingen van 5 tot 10 jaar oud is slechts zeer globaal aan te geven. De Atterbergse grenzen geven voorshands echter een betere correlatie met de gemeten doorlatendheden en erosiegevoeligheid dan het lutumgehalte."

De Atterbergse grenzen worden beïnvloed door het zoutgehalte bij de vorming van de klei (omdat dit de kleimineralogie beïnvloedt, zie paragraaf 3.5.2), maar ook (en zeer sterk) door het organische stofgehalte.[14] Indien dit gehalte hoog is (zoals in het ingangsmateriaal van de Kleirijperij), verhoogt dat de vloeigrens en verplaatst het materiaal zich (ongeveer) evenwijdig aan de A-lijn. [14]

3.3 Consistentieindex

De consistentie-index is een maat voor hoe het watergehalte is van een klei ten opzichte van de vloe- en uitrolgrens. Hij is dan ook gedefinieerd als 1 bij de vloeigrens, en 0 bij de uitrolgrens [60]. De index kan in zekere zin ook worden gezien als een maat voor hoe de sedimentatie, consolidatie en rijping is voortgeschreden. De eis binnen de kleirijperij is dat de consistentie-index lager is dan 0,75, wat overeenkomt met de eis voor het aanbrengen van vulmateriaal (kernmateriaal).⁵

3.4 Organische stof

Organische stof is een belangrijk bestanddeel van slib en klei en komt voor tot ruim 25%. De eis voor klei in de kleirijperij is dat dat gehalte wordt teruggebracht naar maximaal 5%.

Aangezien organische stof een zeer omvangrijke klasse is van stoffen, is het effect daarvan niet eenduidig. Het gehalte organische stof in het Eems-Dollard-estuarium bestaat voornamelijk uit microphytobenthos (een groepering van diverse marine algen) en zogenoemde Yellow Substances (CDOM, coloured organic material) wat voornamelijk bestaat uit humuszure bestanddelen (Brinkman et al, 2015).

De organische stof-fractie is ook in het rijpingsproces niet constant van concentratie of samenstelling. Organische stof wordt microbiologisch omgezet door middel van twee hoofdroutes:

- aëroob (contact aan de lucht) met zuurstof tot CO₂;
- anaëroob (zonder contact met de lucht) tot methaan en CO₂.

Van deze twee routes is de reactiesnelheid in de aërobe route het hoogste. Ook wordt een gedeelte van de organische stof uitsluitend aëroob, maar niet (of nauwelijks) anaëroob afgebroken. De initieel belangrijkste factor bij de aërobe afbraak is de beschikbaarheid van zuurstof. Deze is zeer beperkt (maximaal enkele millimeters). Bij scheurvorming neemt het beschikbare oppervlak echter toe, en daarmee ook de zuurstofindringing [114] [115].

Organisch materiaal heeft ook een effect op de fysische eigenschappen. De meest in het oog springende eigenschap (en meest relevant voor de kleirijperij) is het watervasthoudende karakter. Vergelijkbaar met de fijne fractie aan anorganische deeltjes, leidt een hogere concentratie organische stof tot een hoger watervasthoudend karakter. Dit wordt zowel gezien in het feit dat organische bodems onder vergelijkbare omstandigheden grotere watergehaltes hebben, en dat een sterkere (onder)druk nodig is voor verwijdering van organische stof. De watterretentiecurve (ook wel pF-curve genoemd), die in de bodemkunde vaak wordt gebruikt om het watervasthoudend karakter te beschrijven, ligt dan ook een stuk hoger.

Geotechnisch komt het hogere watervasthoudende gehalte aan de orde in de wijziging van de Atterbergse grenzen: vooral de vloeigrens neemt sterk toe, wat betekent dat al bij relatief hoge watergehaltes het materiaal zich als een vloeistof zal gedragen. Verlaging van de hoeveelheid organische stof door oxidatie

⁵ Dit zou voor Delfzijl slib een watergehalte –indicatief– betekenen beneden 52%.

(/bodenvormig) leidt tot een verlaging van de vloeigrens, en een verschuiving in de Cassagrande-curve parallel aan de A-lijn.

Dit betekent dat de wijziging beperkt effect heeft op de in Nederland bestaande classificatie van erosiebestendige klei: aangezien daarvoor (bij organische kleien) juist verschuivingen ten opzichte van de A-lijn relevant zijn.

Het watervasthoudend karakter is overigens ook relevant bij de scheurvorming: een krimpscheur die ontstaat als gevolg van indrogen zal bij een hoger organisch gehalte makkelijker weer dichtvloeien en daarmee de drainerende eigenschappen aantasten.

3.5 Zoutgehalte

Het zoutgehalte in klei moet in Nederland voor toepassing in dijken onder de 5 g/L zijn (als NaCl in het bodemvocht). Waar marien slib de bron is (zoals in de Eems-Dollard) is verwijdering van zout dus een belangrijke eis. Omdat zout niet verdwijnt met verdamping, kan het alleen advectief verwijderd worden door middel van drainage (aan de boven- of onderkant) en verdunning/uitwisseling met regenwater of andere zoetwater (voornamelijk diffusief). Omdat diffusie alleen effectief is op kleine afstand (of op zeer lange tijd), is de rol van scheuren voor de aanvoer van zoet water en de afvoer van zout water erg belangrijk. De beschreven processen zijn daarmee essentieel voor een goede verwijdering van het zout. Naast het zoutgehalte als eis, heeft het ook een effect op de verschillende stadia van het rijpingsproces. Bovendien is zout in belangrijke mate bepalend voor de kleimineralogie. Effecten van zout en kleimineralogie worden daarom hieronder besproken.

3.5.1 Kleideeltjes en effect van zout

De interactie tussen kleideeltjes en water in slib valt binnen het vakgebied van de fysische chemie. In lage concentraties gaat het hierbij om colloïdchemie: de bepalende kracht in de suspensie is de colloïdale kracht tussen de verschillende deeltjes, die op dat moment groter is dan de zwaartekracht (Harratz, 2016). Colloïdale systemen zijn twee-fasensystemen waarin het water de continue fase vormt, en de slibdeeltjes de discontinue fase. Als een colloïdaal systeem instabiel wordt, treedt aggregatie en vlokvorming op waarna bezinking kan optreden.

Het zoutgehalte en het type zout heeft een zeer sterk effect op deze eerste fase: doordat de kationen op de kleiplaatjes zitten bij de vlokvorming is de totale lading (kleiplaatje en ion) neutraal en stoten de deeltjes elkaar niet af vanwege lading-interacties. Daardoor ontstaan compactere vlokken, die sneller bezinken. Ook relatief lage gehalten aan zout (een lage ionsterkte) hebben een duidelijk effect. Dit effect wordt versterkt door een lage pH.

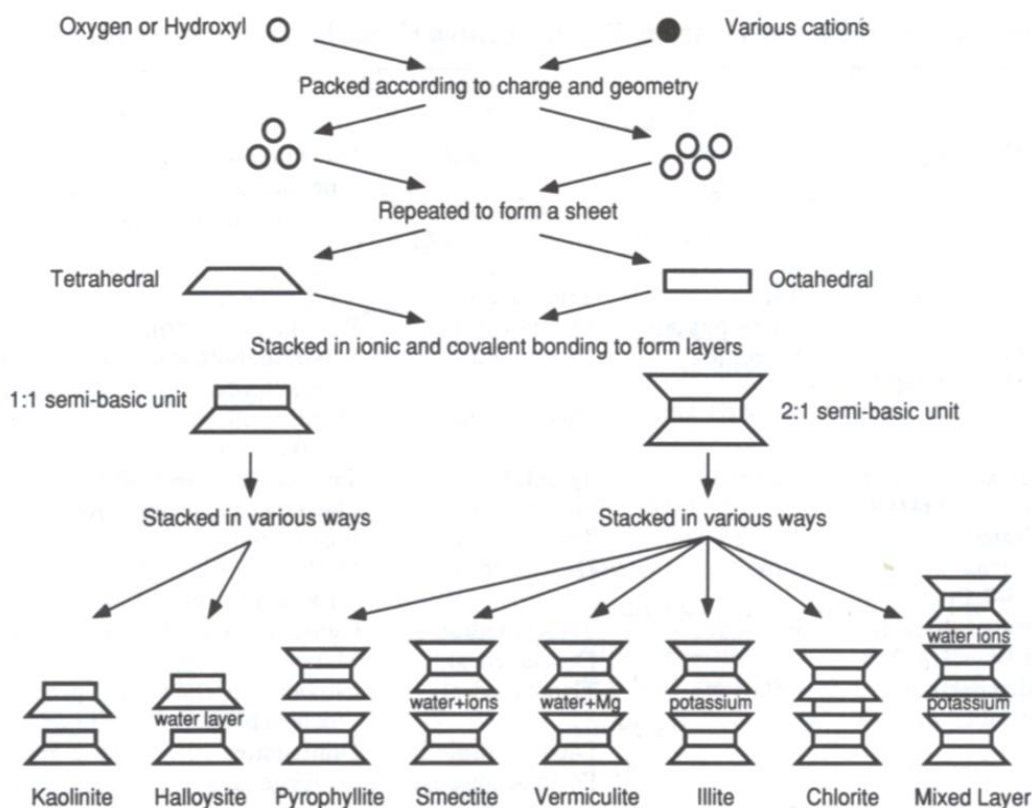
Dergelijke zoute vlokken bezinken initieel goed, wat daarna ook leidt tot een hogere doorlatendheid en een betere consolidatie. Het brengen van een marien slib in een *volledig* zoetwatermilieu is vanwege bovengenoemde eigenschappen af te raden: het leidt tot een slecht bezinkende en consoliderend systeem. In de praktijk zullen dergelijke zoutconcentraties bij marien slib echter niet worden gehaald.

Tijdens de scheurvorming leiden hogere zoutconcentraties in de zwelklei montmorilloniet tot diepere scheuren, die ook beter onderling verbonden zijn [116]. Dit onderzoek is echter uitgevoerd met een klei die vanuit gedroogd materiaal in zout water is opgelost, en niet van toepassing op verdunning nadat het slib is gevormd.

3.5.2 Kleimineralogie

Onder kleimineralogie wordt de samenstelling en de bouw (op moleculaire schaal) van kleiplaatjes bedoeld. Kleimineralen behoren tot de groep van phyllosilicaten, waarin silicaten als (klei)plaatjes (in een plaatvormige structuur zijn) gerangschikt. Deze kleiplaatjes kunnen variëren in chemische samenstelling, silicium speelt altijd, een hoofdrol. Deze structuren kunnen zowel tetra-edrisch en octa-edrisch worden gerangschikt (figuur 7). Tussen de negatief geladen kleiplaatjes bevindt zich positief geladen ionen (kationen) of watermoleculen. De kleimineralogie kan dan ook beschreven worden met drie parameters: bruto-samenstelling van de plaatjes, geometrie van de plaatjes en het type kation ertussen.

De belangrijkste kleimineralen zijn in figuur 7 schematisch weergegeven:



Figuur 7: Samenstelling van verschillende kleimineralen en indeling naar kristalconfiguratie en kation tussen de kleiplaatjes. Uit: [109]

Daarmee ligt de kleimineralogie die in de grond voorkomt in principe besloten in de mineralogie van het slib waaruit het is gevormd. Helemaal vast ligt die daarmee echter niet: uitwisseling van de kationen is mogelijk, en daarmee wijziging van de kleimineralogie. Juist bij consolidatie onder zoute condities, waarbij langzaam verzoeting optreedt, kan er een duidelijk effect zijn op de mineralogie. Hierover is echter weinig informatie beschikbaar. Alleen van het zeer extreme geval van in de ijstijden gevormde de zeer sterk geconsolideerde marine kleien is bekend dat ze door verzoeting hun sterkte kunnen verliezen: deze zogenaamde “quick clays” verliezen door de verzoeting maar langzaam hun sterkte, maar de remoulded strength (de sterkte na versterking) neemt door de verzoeting zeer sterk af, waardoor plotseling bezwijken kan optreden [65]. Een dergelijke situatie is voor de zeer beperkt geconsolideerde klei die in de kleirijperij wordt gemaakt niet aan de orde.

In de Dollard worden voornamelijk de mineralen illiet en smectiet aangetroffen [30]. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat dit ook het hoofdbestanddeel van gerijpte klei zal zijn. Lange rijpingstijden en de start bij een hoog verdunde suspensie kan echter wel tot uitwisseling leiden van de ionen. In geval van verzoeting van illiet en smectite is het daarbij denkbaar dat chlorite of mixed layer kleimineralen ontstaan, of dat –afhankelijk van het ion-milieu overgangen plaatsvinden tussen smectiet en illiet.

4 Praktijk

4.1 Keuze van praktijkcases

In Nederland en in het buitenland is regelmatig baggerspecie gebruikt voor aanleg van nieuw land, ophogingen. Ook is baggerspecie regelmatig gebruikt voor aanleg en versterking van dijken. De projecten zijn zeer divers en hebben soms veel en soms beperkte overeenkomsten met de kleirijperij. Om dit in beeld te brengen is er voor gekozen om eerst een longlist van projecten te maken en daaruit een aantal projecten te selecteren voor een shortlist. De projecten in de shortlist zijn verder uitgediept.

4.1.1 Criteria

Bij de samenstelling van de longlist is gezocht naar voorbeelden en pilots waarin gebaggerd fijnkorrelig materiaal is gebruikt in toepassingen als dijken. Tevens is gezocht naar voorbeelden van grootschalige locaties waar baggerspecie wordt gerijpt. Vervolgens is op basis van een aantal selectiecriteria toegewerkt naar een shortlist. De criteria staan hieronder vermeld.

P	Kritische grootte/omvang	● = Grote pilot / praktijk	● = Kleinschalige proef
L	Geografische ligging (relatie met Waddenzee/Eems-Dollard)	● = Eems Dollard / Waddenzee	● = Elders in de wereld
Z	Herkomstmilieu baggerspecie (zoet of zout)	● = Zout	● = Zoet
D	Rijpingsdoel	● = In een dijk	● = Andere toepassing
I	Beschikbaarheid informatie	● = voldoende informatie	● = (nog) geen of onvoldoende informatie

Bij de projecten is zowel gekeken naar toepassingsprojecten van klei (waar de toepassing op dijkklei was gericht) en naar het rijpingsproces zelf.

P Kritische grootte/omvang

In de verschillende projecten is veel verschil in de omvang van de projecten. Zo zijn er proeven die in laboratoria zijn gedaan of op een kleine schaal waarbij een beperkt aantal m³ zijn beproefd.

L Geografische ligging (relatie met Waddenzee/Eems-Dollard)

Projecten zijn op veel locaties uitgevoerd en in principe is er geen reden waarom projecten uitgevoerd buiten de Waddenzee of Eems-Dollard niet interessant zouden zijn. Er zijn ook projecten in de nabijheid van de kleirijperij uitgevoerd. Indien dit het geval is, zorgt dat ervoor dat veel omstandigheden te vergelijken zijn met de situatie bij de kleirijperij en daarmee zijn de projecten bruikbaar.

Z Herkomstmilieu baggerspecie (zoet of zout)

Niet alle projecten zijn uitgevoerd in een zout milieu. Het ontzouten van de baggerspecie is een belangrijk onderdeel van de kleirijperij en het gebruik van zout materiaal heeft bij de selectie een voorkeur boven projecten die in een zoete omgeving zijn uitgevoerd.

D Rijpingsdoel

Projecten zijn uitgevoerd met verschillende doelen voor ogen. Daarmee worden er ook verschillende eisen gesteld aan het rijpingsproces en het uiteindelijk eindproduct. Voor een aantal projecten is specifiek toepassing in een dijk het doel geweest.

I Beschikbaarheid informatie

Het blijkt niet altijd mogelijk om (voldoende) informatie van de betreffende projecten boven tafel te krijgen. De beschikbaarheid van informatie is daarom ook een selectiecriteria.

4.1.2 Inventarisatie projecten (longlist projecten)

Voorbeelden van grootschalige rijping van baggerspecie

1. Proefpolder Andijk, Nederland (1926)

P L Z D I
● ● ● ● ●

Proefpolder om te testen of de drooglegging van de Wieringermeer en later de Flevopolders technisch mogelijk was. De 40 hectare grote Proefpolder Andijk werd in 1926-1927 aangelegd in de Zuiderzee bij Andijk. Dit gebeurde als proef voor het inpolderen en cultiveren van de latere IJsselmeerpolders. In deze polder konden, op kleine schaal, praktische ervaringen worden opgedaan met het in cultuur brengen van de gronden in de nieuw aan te leggen Wieringermeer. Deze gronden bevatten een hoog zoutgehalte omdat deze eeuwen door zeewater waren bedekt.



Figuur 8: Luchtfoto Proefpolder Andijk 1926

2. Rostock, Duitsland (heden)

P L Z D I
● ● ● ● ●

Rijpingsvelden waar de natte baggerspecie afkomstig uit deelstaat Mecklenburg – Vorpommern wordt verwerkt.

3. Hamburg, Duitsland (heden)

P L Z D I
● ● ● ● ●

Industriële verwerking van baggerspecie. Jaarlijks wordt ca 550 000 ton baggerspecie (na drogen ca 1 000 000 m³) verwerkt.

4. Bremerhaven, Duitsland (heden)

P L Z D I
● ● ● ● ●

16 Baggerspeciedepots voor de verwerking van het slib uit Bremerhaven.

5. Waddenzeekustvlakte, Nederland, Duitsland (heden, op beperkte schaal) in Duitsland

P L Z D I
● ● ● ● ●

Landaanwinning door natuurlijke processen met wadden en kwelders.

6. IJsselmeerpolders (jaren '20 – '60)

P L Z D I
● ● ● ● ●

Metingen aan ingepolderde gebieden:

- Flevopolder (jaren '50-'60);
- Noordoostpolder (jaren '40);
- Wieringermeer (jaren '20).

Binnen deze grootschalige projecten zijn metingen verricht en deze zijn gedocumenteerd in een serie Flevo-berichten.

Voorbeelden van toepassing baggerspecie in dijken

8. Afsluiting Lauwerszee (1970)

P L Z D I
● ● ● ● ●

De Lauwerszee is in 1969 Lauwersmeer geworden door het gereed komen van de afsluitdijk van de Lauwerszee. Bij de afwerking van de dijk in 1970 is baggerspecie gebruikt als bekledingsmateriaal en die heeft eerst gerijpt op de dijk zelf voordat het gras is ingezaaid. De klei werd gewonnen nabij Oostmahorn en was zout.

9. Wijdewormerringdijk, Nederland

P L Z D I
● ● ● ● ●

De Wijdewormer of kortweg (De) Wormer is een polder en droogmakerij in de gemeente Wormerland, in de provincie Noord-Holland, in het noordoosten van de Zaanstreek. Anders dan veel andere droogmakerijen in de provincie Noord-Holland, was de Wijdewormer gevuld met zoet water en was er geen eb en vloed. Er was dus geen open verbinding met zee. De 1666 ha grote polder viel in 1626 droog. De polder wordt omsloten door de Ringvaart van de Wijdewormer die via de Braak in verbinding staat met de Zaan. Bij de dijkverbetering van de ringdijk (regionale waterkering) is de binnenberm van de boezemkade verstevigd door gebiedseigen baggerspecie toe te passen, die is gewonnen uit een tegelijkertijd aangelegde waterberging in de polder.

10. Gamerwolde, Nederland (2015-2018)

P L Z D I
● ● ● ● ●

In dit gebied wordt tussen Woltersum en de Bronssluis de kade van het Eemskanaal Noordzijde verbreed en worden delen van het gebied tussen het Eemskanaal en het Damsterdiep opgehoogd met zand en baggerslib.

Meer informatie: [https://www.noorderzijvest.nl/ons-werk/projecten/projecten-\(lopend\)/dijkpark-ten-boer/](https://www.noorderzijvest.nl/ons-werk/projecten/projecten-(lopend)/dijkpark-ten-boer/)

11. Rostock, Duitsland (lopend)

P L Z D I
● ● ● ● ●

In Rostock is een testdijk vanuit het EU-project DredgDikes aangelegd waarin het gebruik en gedrag van gebaggerd materiaal in een dijk wordt getest.

Meer informatie: www.dredgdikes.eu

12. Körkwitzer Bach, Duitsland (lopend)

P L Z D I
● ● ● ● ●

In Körkwitzer Bach nabij Ribnitz-Damgarten, 30 km ten noordoosten van Rostock is een testdijk vanuit het EU-project DredgDikes aangelegd.

13. Bremerhaven, Duitsland (lopend)

P	L	Z	D	I

900 meter lange dijk waarbij de oorspronkelijke kern van zand is vervangen door een kern van gebaggerd materiaal uit Bremerhaven.

14. Maededeich, Duitsland (lopend)

P	L	Z	D	I

Versterking van dijklichaam waarbij de afdeklaag is vervangen door gerijpte baggerspecie.

15. Gdansk (Trzcinsko), Polen (lopend)

P	L	Z	D	I

Testdijk uit het project DredgDikes. Meer informatie: www.dredgdikes.eu

16. Antwerpen, België

P	L	Z	D	I

Gebruik van zandige baggerspecie die vrijgekomen is uit de aanleg van de draaicirkel voor de Deurganckdok in de Schelde. Toegepast inde kern van dijken langs de Schelde in het kader van het Sigmaplan (De Belgische variant van ons Deltaplan).

Meer informatie: www.sigmaplan.be

17. Compartimentsdijk Vlassenbroek, België

P	L	Z	D	I

Bagger direct toegepast in 800 meter lange compartimentdijk
meer informatie: <http://sigmaplan.be/nl/projecten/vlassenbroek/verhalen/compartimenteringsdijk-uit-baggerspecie/>

18. Port of Avilés, Spanje

P	L	Z	D	I

Zandig baggermateriaal ingezet als kernmateriaal voor de verlenging van de kade.
Onvoldoende informatie beschikbaar om verder te verdiepen.

19. Dijk bij Haven van Duinkerke (Frankrijk) (recent)

P	L	Z	D	I

Gerijpte bagger toegepast voor gehele dijk.
Onvoldoende informatie beschikbaar om verder te verdiepen.

20. Haven van Harwich (UK) (recent)

P	L	Z	D	I

Hergebruikt alle bagger voor dijken en natuur.
Onvoldoende informatie beschikbaar om verder te verdiepen.

21. IJperveld + Jisperveld, Nederland (recent)

P	L	Z	D	I

In dit project is rijpingsonderzoek uitgevoerd binnen het "Lift up of Lowlands-programma", waar gekeken wordt bodemdaling tegen te gaan door gebruik (en opmengen) van bagger [97][98]. Het gaat om een veenweidegebied, waardoor het baggerslib zeer sterk organisch is (meer dan 40%), waardoor niet direct van kleivorming gesproken kan worden.

Te hoog organisch gehalte (en daarmee te beperkte link met kleirijperij) om verder te verdiepen.

- | | |
|---|-----------------------------------|
| <p>22. Deltadijk Hoek van Holland-Maassluis, Nederland (Euroklei, jaren '80)</p> <p>Proefvakken gemaakt van Euroklei, onder anderen vermeld in lit [32]. Beschreven in diverse rapportages over Euroklei, klei, die gerijpt is in een “grondfabriek” op de Maasvlakte.</p> | <p>P L Z D I</p> <p>● ● ● ● ●</p> |
| <p>23. Dijk Maasvlakte, Nederland (Euroklei, jaren '80)</p> <p>Proefvakken gemaakt van Euroklei, onder anderen vermeld in lit [32]. Beschreven in diverse rapportages over Euroklei, klei, die gerijpt is in een “grondfabriek” op de Maasvlakte.</p> | <p>P L Z D I</p> <p>● ● ● ● ●</p> |
| <p>24. Dijk Streefkerk, Nederland (Euroklei, jaren '80)</p> <p>Proefvakken gemaakt van Euroklei, onder anderen vermeld in lit [32]. Beschreven in diverse rapportages over Euroklei, klei, die gerijpt is in een “grondfabriek” op de Maasvlakte.</p> | <p>P L Z D I</p> <p>● ● ● ● ●</p> |
| <p>25. Ontwikkeling Lauwerszee tot Lauwersmeer, Nederland (jaren '60)</p> <p>Bij de aanleg van de afsluitdijk van de Lauwerszee is ongerijpte zoute klei als bekledingsmateriaal gebruikt.</p> | <p>P L Z D I</p> <p>● ● ● ● ●</p> |

Voorbeelden van andere toepassingen van baggerspecie

De volgende projecten zijn verder ook geïnventariseerd, maar bestempeld als niet relevant voor het project kleirijperij waar het gaat om het maken van dijkklei.

Toepassing baggerspecie in (weg)ophogingen en andere civieltechnische werken

26. Gent (Fasiver), België: Gebruik van verontreinigde baggerspecie voor het ophogen van brownfields;
27. Ophoging A5 (Hoofddorp);
28. Ophoging A50 (Veghel);
29. Geluidswal Oost-Souburg (Zeeland);
30. Geluidswal Beuningen;
31. Geluidswal Rotterdam;
32. Chubu International Airport, Japan: gebruik van zandig gebaggerd materiaal voor de aanleg van een vliegveld;
33. New Kitakyushu Airport, Japan: gebruik van zandig gebaggerd materiaal voor de aanleg van een vliegveld;
34. Port of Gävle (Zweden): Gerijpte slib toegepast in havenuitbreiding.

Toepassing baggerspecie als afdeklaag

35. Afdekken stortplaats IJperveld.

Kustreparatie

36. Mikawa Bay, VS;
37. Cadiz Harbour en La Victoria Beach: baggerspecie ingezet voor kustbehoud (aanwas kust);
38. Onomichi-Itosaki Port, Japan.

Creatie van natuurwaarde:

39. Galveston Harbour: gebruik van baggerspecie vrijgekomen uit verdieping voor de aanleg van een eiland t.b.v. natuur;
40. Chiba Port, Japan: gebaggerd materiaal is gebruikt voor het verondiepen van diepe zandwinputten in het havengebied zodat een beter milieu ontstaat voor onder andere vissen;
41. Rice Island: baggerspecie ingezet om nieuwe broedplaatsen te creëren voor vogels;
42. Wallasea, UK: creatie van zoute moerassen;
43. IJsseldelta: Creatie van een groot natuurgebied in de IJsselmonding door gebruik te maken van baggermateriaal.⁶
44. Cà di Mezzo Project: creatie van moeras door gebruik van zandig gebaggerd materiaal;
45. Humber Estuary: gebruik van baggermateriaal voor verondiepingen;
46. Norwich (UK): Bagger vastleggen voor natuurontwikkeling;
47. Markerwadden (NL): maken van eilanden in het Markermeer met baggerslib uit het Markermeer.

Toepassing in verondiepingen

48. Schelde estuarium: gebruik van baggerspecie voor het verondiepen van het estuarium;
49. Port of Oakland, VS: Gebruik van baggerspecie vrijgekomen bij de verdieping van de haven om elders de waterweg te verondiepen en zo natuurwaarden te creëren.

Productie van bouwstoffen

50. Hamburg (bakken van stenen uit baggerspecie);
51. Euroklei⁷.

4.1.3 Shortlist

De shortlist is een beperkte lijst van praktijkervaringen en pilots met de rijping van baggerspecie en de toepassing van gebruikte baggerspecie. Het doel van de shortlist is diepgaandere informatie te verkrijgen over de rijping en toepassing van baggerspecie en deze (praktijk)ervaringen te vertalen naar de kleirijperij zoals bedoeld in het project Ecoshape. Om te komen tot de shortlist zijn de criteria gehanteerd zoals beschreven in paragraaf 4.1.1. In de praktijk is gebleken dat het criterium beschikbare informatie erg dominant is geweest bij de selectie van de shortlist. Het is echter wel gelukt om projecten te vinden die ook aan de andere criteria voldoen. De projecten die verder zijn uitgediept zijn:

Nr.	Praktijkcase	Paragraaf
01	Afsluiting Lauwerszee (Lauwersmeerdijk)	4.2
02	IJsselmeerpolder (inpoldering)	4.3
03	Euroklei (grondfabriek en diverse dijkversterkingen)	4.4
04	DredgDike (diverse cases)	4.5
05	Slufter (dijkversterking Haven Rotterdam)	4.6
06	Haven van Hamburg (Metha-Anlage, en proefdijk)	4.7

⁶ Gerelateerd aan dit project was ook creatie van een ontwikkeling van het natuurgebied aan de oostzijde van het baggerspeciedepot IJsseloog. Dit gebied is aangelegd met holoceen materiaal afkomstig t.p.v. waar het depot is gebaggerd. Hier had het ontgraven holoceen materiaal minder samenhang waardoor het uitvloeide en niet als gepland toepasbaar was.

⁷ Euroklei is project 3 op de shortlist en beschreven in paragraaf 4.4. Bij Euroklei is tevens gekeken naar de vorming van bakstenen

Daarnaast zijn er nog een aantal interessante projecten benoemd waar bij het schrijven van deze rapportage onvoldoende informatie van beschikbaar was. De projecten zijn wel kort beschreven.

Nr.	Praktijkcase	Paragraaf
07	Spoelvelden/rijpingsvelden, Rostock	4.8.1
08	Bremen ontwateringsvelden, Bremen	4.8.2
09	Dijkkern van gebaggerd materiaal, Bremerhaven	4.8.4
10	Maadedeich	4.8.5
11	Compartimenteringsdijk Vlassebroek	4.8.6
12	Versterking Delflandse dijk, Hoek van Holland-Maassluis	4.8.7
13	Dijkpark Ten Boer, Gamerwolde	4.8.8
14	Noordzeekustvlakte, Nederland/Duitsland	4.8.9

4.2 Aanleg Afsluitdijk Lauwerszee (Lauwersmeerdijk)

Over de afsluitdijk van de Lauwerszee is een Flevobericht geschreven [81]. Hier onder staat een samenvatting van dit Flevobericht.

Bij de aanleg van de afsluitdijk van het Lauwersmeer is de kleibekleding uitgevoerd met ongerijpte zoute klei die na rijping en ontzilting is ingezaaid met gras. De klei is gewonnen bij Oostmahorn (westzijde van Lauwersmeer (toen Lauwerszee)). Er zijn na aanleg verschillende monsters genomen in de tijd om de rijping, ontzilting en inklinking te monitoren. De kleibekleding is aangelegd in dikte van 0,2 tot 1,0 meter. Er zijn vergelijkingen gemaakt tussen rijping en ontzilting van de bekledingsklei en de klei van ingepolderde kwelders van de Lauwerszee.

De belangrijkste bevindingen waren:

- De eigenschappen van de klei in de kwelders en de klei gebruikt als bekleding hadden nagenoeg de zelfde eigenschappen.
- De bovenste 20 cm van de klei ontzilte vrij snel waardoor binnen een jaar het gras gezaaid kon worden.
- De ontzilting van de gehele bekledingslaag verliep niet sneller dan de klei in ingepolderde kwelders van de Lauwerszee, ondanks de diepere ontwatering.

De klei in de kwelders is beter geaereerd en verkruid dan de bekledingsklei. Dit weegt vermoedelijk op tegen de diepere ontwatering.



Figuur 9: Foto van aanleg Afsluitdijk Lauwerszee 1969

- Het indrogen van de klei ging bij de bekledingsklei sneller dan in de kwelders. Zie onderstaande bepaalde n-factoren (waterfactoren):

Tabel 3: Bepaalde n-factoren tijdens rijping bij afsluiting Lauwerszee. Bron: [81]

laag in cm - mv	n-factor bekledingsklei per jaar na het afwerken							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0 - 5	0,25	0,39	0,13	0,33	0,50	0,49	0,45	0,52
5 - 20	0,82	0,82	0,75	0,60	0,59	0,65	0,46	0,52
20 - 40	0,97	1,00	0,98	0,83	0,83	0,61	0,58	0,63
40 - 60	1,00	1,09	1,05	0,99	0,92	0,75	0,75	0,75
60 - 80	1,16	1,06	0,89	1,00	0,94	0,81	0,78	0,77
80 - 100	0,96	1,06	1,05	1,08	1,16	0,92	0,86	1,07
n-factor begreppelde kweldergronden								
	1969	1970	1971	1972	1973			
0 - 5	1,20	1,05	0,92	0,67	0,57			
5 - 20	1,18	1,49	1,05	0,99	0,89			
20 - 40	1,16	1,19	0,89	1,22	0,87			
40 - 60	1,09	1,12	0,92	1,03	0,93			
60 - 80	1,26	1,11	1,11	1,16	0,99			
80 - 100	1,29	1,29	1,07	0,94	0,89			
n-factor begreppelde bezinkvelden								
	1969	1970	1971	1972	1973			
0 - 5	1,49	1,29	1,00	0,93	0,52			
5 - 20	1,33	1,18	1,08	0,96	0,70			
20 - 40	1,16	1,10	1,08	1,26	1,31			
40 - 60	1,24	1,08	1,06	1,13	1,03			
60 - 80	1,26	1,29	1,27	1,56	1,20			
80 - 100	2,01	1,53	1,27	1,63	1,32			

- De inklinking van de klei was 8 jaar na aanbrengen 14% van de oorspronkelijke dikte;
- De indroging gaat gepaard met chemische veranderingen. De volgende chemische veranderingen zijn geconstateerd:
 - Fosfaatgehalte (P_{citr}) is weinig veranderd;
 - Het kaligehalte (K_{HCL}) duidelijk gedaald. Daarmee is de pH verlaagd.

Deze bevindingen komen overeen met eerdere literatuur van Zuur uit 1954, Bodemkunde der Nederlandse bedijking en droogmakerijen (niet gevonden literatuur).

4.3 IJsselmeerpolders

In de periode van de jaren 40, 50 en 60 zijn de polders in het IJsselmeer ontwikkeld. Hierbij is geen baggerspecie aangebracht, maar is wel veel ervaring opgedaan met het ontwateren en rijpen van klei na het droogleggen van de polders. Door Rijkswaterstaat is een hele serie “Flevoberichten” opgesteld waarin opgedane kennis is opgeschreven. De Flevo berichten hadden een zeer brede blik op de ontwikkeling van de polders. Dit varieerde van technische onderwerpen tot sociaal-maatschappelijk of van stedenbouwkundige tot ecologische onderwerpen.

Voor deze literatuurstudie zijn de volgende publicaties bestudeerd:

- Flevobericht 93 (ontzilting en rijping van bekledingsklei en ontwikkeling grasmat afsluitdijk Lauwerszee) [81];
- Flevobericht 228 (Ontwatering der Wieringermeergronden) [82];
- Flevobericht 229 (Invloed van kwel op rijping van kleigrond Oostelijk Flevoland) [83];
- Flevobericht 269 (Wording en opbouw van Noordoostpolder, 4 delen) [84].

De geschreven rapporten hebben vaak veel oog voor de landbouwkundige mogelijkheden van de nieuwe grond. Hoewel hier overlap in zit, wordt in de Flevoberichten niet gekeken naar de waterbouwkundige mogelijkheden van de ontstane gronden.

4.3.1 Wieringermeer

Flevobericht 228 (Ontwatering der Wieringermeergronden) [82]

In dit rapport worden de resultaten van proeven met ontwateren in de Wieringermeer gerapporteerd. Er zijn proeven met verschillende intensiteit van ontwateren aangelegd en hier is aan gemeten. In de rapportage (ruim 200 pagina's dik) worden de resultaten besproken.

Er is in het onderzoek gevarieerd met drainage afstanden en drainage technieken en hierbij is met name gekeken naar de lange termijn. Er wordt gesproken over slootafstanden van 20 tot 50 meter na 10 jaar. Drainage technieken die worden gebruikt zijn buizen van verschillende materialen (hout, ijzer en aarde (vermoedelijk greppel)).

Er wordt een correlatie gevonden van het watergehalte bij droogvallen met het kleigehalte:
Watergehalte = $20 + 1,6 \times (\text{Kleigehalte})$.

Gevonden is dat de doorlatendheid in de bovenste lagen het eerste jaar duidelijk toenam en daarna gelijk bleef. Verder wordt genoemd dat gronden met een laag lutum gehalte (7%) ook na 10 jaar nog vrij doorlatend zijn (maar hiervoor wordt geen verklaring gegeven).

4.3.2 Oostelijk Flevoland

Flevobericht 229 (Invloed van kwel op rijping van kleigrond Oostelijk Flevoland) [83]

Bij het droog vallen van oostelijk Flevoland was het land nog slap en onbegaanbaar. Door kwel in het zuidelijke deel vertraagde het rijpingsproces. Dit rapport heeft hier onderzoek naar gedaan.

De diepte van de grondwaterstand is gecorreleerd aan de scheurvorming en de scheurvorming is weer gecorreleerd aan de rijpingsnelheid. Door diepere scheurvorming worden de volgende processen gestimuleerd:

- Ontwatering van materiaal (water kan wegstromen);
- Oxidatie van ijzersulfide in de grond (Aëratie; dit veroorzaakt ook een kleuromslag van blauw/zwart naar bruin/grijs).

Verder wordt het verloop van het de grondwaterstand in de tijd beschreven. Hiervoor moet eerst een n-factor worden bepaald aan de hand van onderstaande formule (A=Watergehalte).

$$n = \frac{A-20}{L+bH}, \text{ waarin } A = \text{A-cijfer}$$

L = lutumgehalte
 b = 3 (factor voor het gehele profiel gelijk gehouden)
 H = humusgehalte
 n = waterfactor

Figuur 10: Berekening van de n-factor (waterfactor). Bron: [83]

Vervolgens kan in de tabel hieronder de grondwaterstand worden afgelezen.

kavel diepte in cm - m.v.	februari 1961		april 1964		april 1965		augustus 1965	
	n-factor	grond- water- stand	n-factor	grond- water- stand	n-factor	grond- water- stand	n-factor	grond- water- stand
Y 90 0-0,20	1,26	0,25	-	0,64	0,59	0,46	0,50	ca.0,60
0,20-0,40	1,55		-		0,92		1,14	
0,40-0,60	1,92		-		1,43		1,57	
0,60-0,80	2,03		-		1,80		2,22	
0,80-1,00	2,01		-		-			
Y 70 0-0,20	1,24	0,30	0,40	0,71	0,46	0,55	0,37	0,68
0,20-0,40	1,61		0,82		0,61		0,81	
0,40-0,60	1,94		1,40		0,94		1,26	
0,60-0,80	2,08		1,64		1,36		1,56	
0,80-1,00	1,89		1,93		1,76		2,08	
Y 53 0-0,20	1,44	0,29	0,54	0,90	0,43	0,47	0,47	0,85
0,20-0,40	1,62		1,04		0,80		0,82	
0,40-0,60	1,82		1,62		1,03		1,31	
0,60-0,80	2,04		1,75		1,54		1,74	
0,80-1,00	1,95		1,86		1,78		2,03	
Y 37 0-0,20	0,95	0,60	0,43	0,70	0,44	0,75	0,47	ca.1,00
0,20-0,40	1,10		0,75		0,68		0,67	
0,40-0,60	1,27		1,00		1,00		1,33	
0,60-0,80	1,64		1,42		1,49		1,60	
0,80-1,00	1,72		1,76		1,52		1,98	
Y 22 0-0,20	-	0,60	0,55	0,88	0,41	0,77	0,38	ca.1,09
0,20-0,40	-		0,82		0,62		0,73	
0,40-0,60	-		1,07		0,87		0,97	
0,60-0,80	-		1,41		1,09		1,35	
0,80-1,00	-		1,66		1,71		1,85	
Y 7 0-0,20	-	0,55	0,47	0,87	0,43	0,68	0,34	ca.1,11
0,20-0,40	-		0,83		0,67		0,74	
0,40-0,60	-		1,10		0,97		1,09	
0,60-0,80	-		1,51		1,33		1,55	
0,80-1,00	-		1,73		1,77		1,94	

Tabel 4: Bepaalde n-factor (waterfactor). Bron: [83]

Verder worden er een aantal op chemie gerichte conclusies getrokken:

- Geconcludeerd dat de eerste 3 tot 4 jaar het gehalte koolzure kalk daalt door het binnendringen van regenwater.
- Het fosfaatgehalte loogt niet uit en verandert daardoor nauwelijks.
- Verder neemt het gehalte Kali (dat door het voormalige zeewater erg hoog was weer wel af).
- De verhouding tussen wel en niet opneembare stikstof verbindingen is voortdurend aan verandering onderhevig.

4.3.3 Noordoostpolder

Over de wording van de Noordoostpolder is een samenvattende Flevo-rapportage [84] geschreven. Deze rapportage is opgebouwd uit 4 delen:

- Deel 1 landbouwkundig onderzoek;
- Deel 2 Het in cultuur brengen der drooggevallen grond;
- Deel 3 De inrichting en ontwikkeling van het landbouwgebied;
- Deel 4 De ontwikkeling der dorpen.

Voor de kleirijperij is alleen deel 1 relevant. Dit deel bestaat uit een bundeling van verschillende type onderzoeken. Zo zijn in dit deel verschillende onderzoeken gerapporteerd. Voor de kleirijperij zijn de bodemkundige onderzoeken relevant. Er is ook plantteeltkundig, biologisch, microbiologisch en oudheidkundig onderzoek gerapporteerd, maar daar wordt nu niet op in gegaan.

De relevante bodemkundige onderzoeken gaan over:

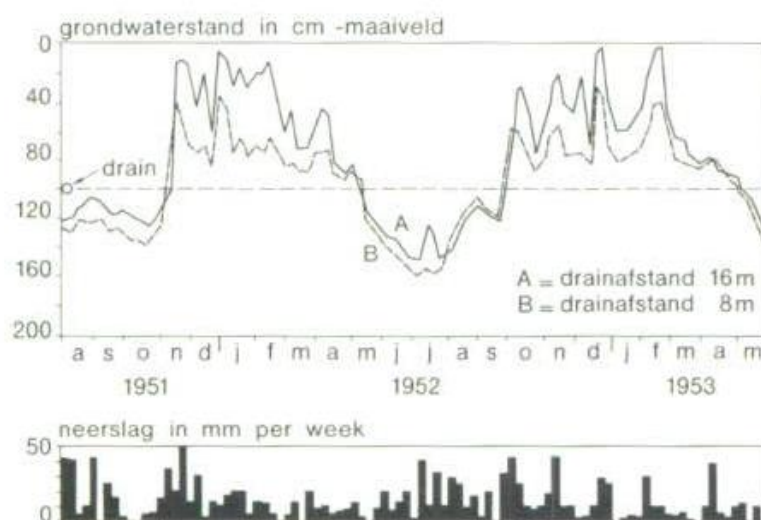
- Rijping

Bij het droogvallen van de Noordoostpolder traden tal van chemische en fysische veranderingen op die onder "rijping" worden geschaard. De focus lag op verkleuring (aeratie) en indroging. In dit onderzoek worden verschillende verbanden gelegd:

- Aeratie (oxidatie van ijzersulfide in de grond) in de diepte en tijd.
- Verband tussen Lutumgehalte en soortelijk gewicht.
- Scheurvorming en verbrokkeling in de tijd.
- Verhouding grondwaterstand en afvoer via greppels in de tijd (dit zegt iets over de scheurvorming).

- Ontwatering

In dit onderzoek wordt gerapporteerd over de mate van ontwatering. In de Noordoostpolder is in eerste instantie ontwaterd met greppels en daarna met drains. Er is gemeten bij drainafstanden van 8 en 16 meter.



Figuur 11: Ontwikkeling grondwaterstand. Bron: [84]

Geconstateerd wordt dat de doorlatendheid bij zandgronden gedurende de rijping niet verandert en dat dit wel gebeurt bij meer kleiige gronden. Bij kleiige grond neemt de waterdoorlatendheid in de toplaag toe als gevolg van scheurvorming. Er is bij de Noordoostpolder op basis van experimenten een optimale greppel afstand gevonden. Hierbij is onderscheid gemaakt in de aanwezigheid van zavel.

Tabel 5: Aanwezigheid van zwavel. Bron: [84]

Profiel	Hoofdgrondsoort	
	lichte zavel	zware zavel + klei
volledig bestaande uit hoofdgrondsoort	8-10	12
cm hoofdgrondsoort op lichte zavel		
60	8-10	12
50	8-10	10-12
40	8-10	8-12
30	8-10	8-10
cm lichte zavel op hoofdgrondsoort		
50	8-10	8-10
40	8-10	8-12
30	8-10	10-12
20	8-10	12

■ Ontzilting en verzilting

Geconstateerd is dat doordat de Noordoostpolder 10 jaar na de afsluiting van de Zuiderzee is ingepolderd de bovenste meter van de bodem reeds ontzilt was. In het onderzoek is met name ingegaan op locatie met kwel uit de ondergrond, waardoor de grond zouter werd. Verder wordt geconstateerd dat door de aanwezigheid van zoet water op het nog in te polderen deel er een gelijkmatige ontzilting heeft plaats gevonden. Na inpoldering zijn er zoutere en mindere zoutere locaties ontstaan door verschillen in kwel en grondwaterstroming.

4.4 Euroklei

In de jaren 70 en 80 heeft een omvangrijk onderzoek plaats gevonden genaamd Euroklei. Binnen dit onderzoek is er gezocht naar diversen toepassingsmogelijkheden van gerijpte baggerspecie. Dit onderzoek werd vanuit twee invalshoeken gemotiveerd:

1. In de haven van Rotterdam was een overschot aan baggerspecie en er werd gezocht naar een verantwoorde manier om dit te kunnen hergebruiken. Het overschot werd veroorzaakt door het toenemende milieubewustzijn, waardoor storten van deze (vervuilde) baggerspecie op de Noordzee niet meer werd toegestaan.
2. Er was een grote behoefte aan klei die gebruikt kon worden in de ophanden zijnde dijkversterkingen.

Voor deze studie zijn vele rapporten geschreven en de bevindingen zijn samengevat in het rapport: Toepassing van euroklei in de dijkenbouw – Samenvattende rapportage [88].

4.4.1 Grondfabriek voor Euroklei

Het basismateriaal van Euroklei is gebaggerde (zout/brak) slib uit het Oostelijk havengebied van Rotterdam (waar onder anderen de Waal-, Maas- en Rijnhaven liggen). Het gebaggerde materiaal is uitgebreid bemonsterd. Hier zijn onderstaande karakteristieke parameters uit naar voren gekomen.

Tabel 6: Bodemkundige samenstelling baggerspecie van Euroklei en de bronlocatie (Oostelijk havengebied van Rotterdam). Bron: [88]

Materiaal	korrelfractie			Organische stofgehalte	kalkgehalte
	< 2 μm	< 16 μm	> 63 μm		
Oostelijke specie	20-30%	40-60%	25-35%	5-10%	5-20%
Euroklei	25-35%	45-65%	20-30%	4-7%	15-20%

De rijping vond plaats in een op de Maasvlakte gelegen “Grondfabriek”, waarin in circa 2 jaar rijping plaatsvond. Daarbij werd gebruik gemaakt van begreppeling. Vervolgens werd de klei “op ruggen gezet”. Een impressie van het materiaal en de bewerking is te zien in figuur 12.



Figuur 12: Euroklei op ruggen gezet (links) en geproduceerde Euroklei (rechts, 1987) -Rijkswaterstaat / Jan Muijs / Ronald van Etten)

Voornamelijk op basis van het Euroklei-onderzoek wordt de volgende relatie voorgesteld tussen initiële laaghoogte en rijpingstijd [103]:

$$t_{rijping} \sim H^{1,5}$$

Verder wordt er gebruik gemaakt van de n-factor. Hiervoor is in dit onderzoek de onderstaande relatie gehanteerd. In de Flevo-berichten over de IJsselmeerpolders wordt deze factor ook genoemd, maar wel anders bepaald (zie paragraaf 4.3)⁸.

⁸ In de Flevoberichten met betrekking tot de IJsselmeerpolders wordt een vereenvoudigde versie gebruikt, waarin de term $p(100-L-H)$ op 20 wordt gesteld, en b op 3.

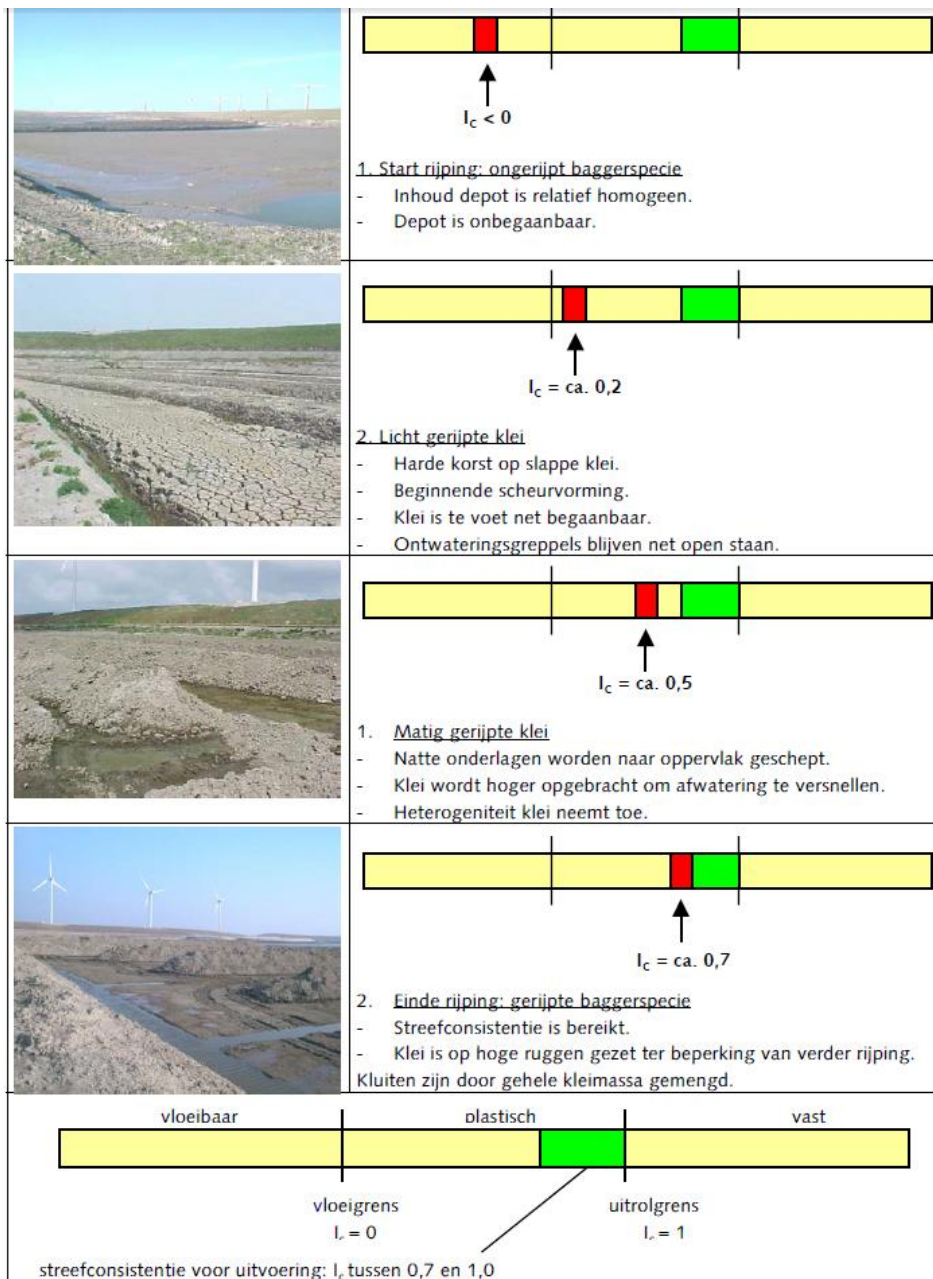
$$n = \frac{W - p(100 - L - H)}{L + bH}$$

Hierin is:

- b: de verhouding tussen het waterbindend vermogen van een bepaalde gewichtshoeveelheid organische stof tot dat van eenzelfde hoeveelheid lutum;
- p: het aantal grammen vocht, gebonden door 1 gram niet colloidaal materiaal (droge grond minus lutum en organische stof);
- L: het gewichtspercentage lutum betrokken op de droge stof;
- H: het gewichtspercentage organische stof betrokken op de droge stof.

Figuur 13: Bepaling n-factor (rijpingsfactor). Bron: [88], pagina 4

Een overzicht van hoe de consistentiegrenzen van gevormde Euroklei in depot zich ontwikkelen wordt weergegeven in figuur 14.



Figuur 14: Verloop van de rijping in het depot op de sluffer, en een indicatie van de consistentie index

Naast bovenstaande parameters is er ook uitgebreid onderzoek gedaan naar de milieu-hygiënische eigenschappen van de klei. Dit is locatie specifiek en niet direct toepasbaar voor de kleirijperij en daarom wordt daar nu niet verder op in gegaan.

In de conclusies wordt de geschiktheid van de klei met betrekking tot dijkenbouw en zoutgehalte beschreven. Daarbij wordt aangegeven dat voor de klei als kernmateriaal geen zout-norm zou hoeven gelden, maar dat voor de toplaag een maximumwaarde van 4% (NaCl van het porievocht).

4.4.2 Dijkvakken waarin Euroklei is verwerkt

Er is een drietal proefvakken ingericht waar geëxperimenteerd is met het toepassen van Euroklei. Bij alle proefvakken is gebruik gemaakt van een traject Euro klei en een traject traditionele klei om een goed vergelijking te kunnen maken. De proefvakken zijn:

1. Proefvak hulpkade Streefkerk:
 - September 1981;
 - 133 meter lang;
2. Proefvak Deltadijk Streefkerk:
 - Maart 1982 – juni 1984;
 - 135 meter lang;
3. Proefvak Deltadijk Hoek van Holland:
 - Juni-juli 1982;
 - 200 meter lang.



Figuur 15: Scheurvorming bij buitendijkse dijkverzwaring (linkeroever Lekdijk in de Alblasserwaard) met Euroklei in 1988 (Rijkswaterstaat / Dico van Ooijen)

Bij de vergelijking tussen de Euroklei en de traditionele klei is het volgende geconstateerd:

- Verwerkbaarheid: Zowel de Euroklei als de traditionele klei waren goed verwerkbaar indien de verwekingsindex (I_c) $\geq 0,75$.
- Verdichting: De gewenste verdichting van zowel de Euroklei als de traditionele klei is niet gehaald.

- Wrijvings eigenschappen: Deze waren voor Euroklei en traditionele klei ongeveer gelijk

Lokatie	tijdstip	trad klei		Euroklei	
		ϕ	c	ϕ	c
		°	kN/m ²	°	kN/m ²
proefvak hulpkade	na aanleg	24,0	4,5	23,6	3,0
proefvak Deltadijk Streefk.	na aanleg	23,1	3,2	23,0	7,8
	na 1 jaar	23,7	5,9	25,9	6,5
proefvak Deltadijk H.v.H.	na aanleg	24,9	6,7	23,6	5,9
	na 1 jaar	25,8	6,7	23,5	5,0
	na 2 jaar	23,6	10,5	20,8	12,2

Tabel 7: Wrijvings eigenschappen Euroklei. Bron: [88], pagina 19

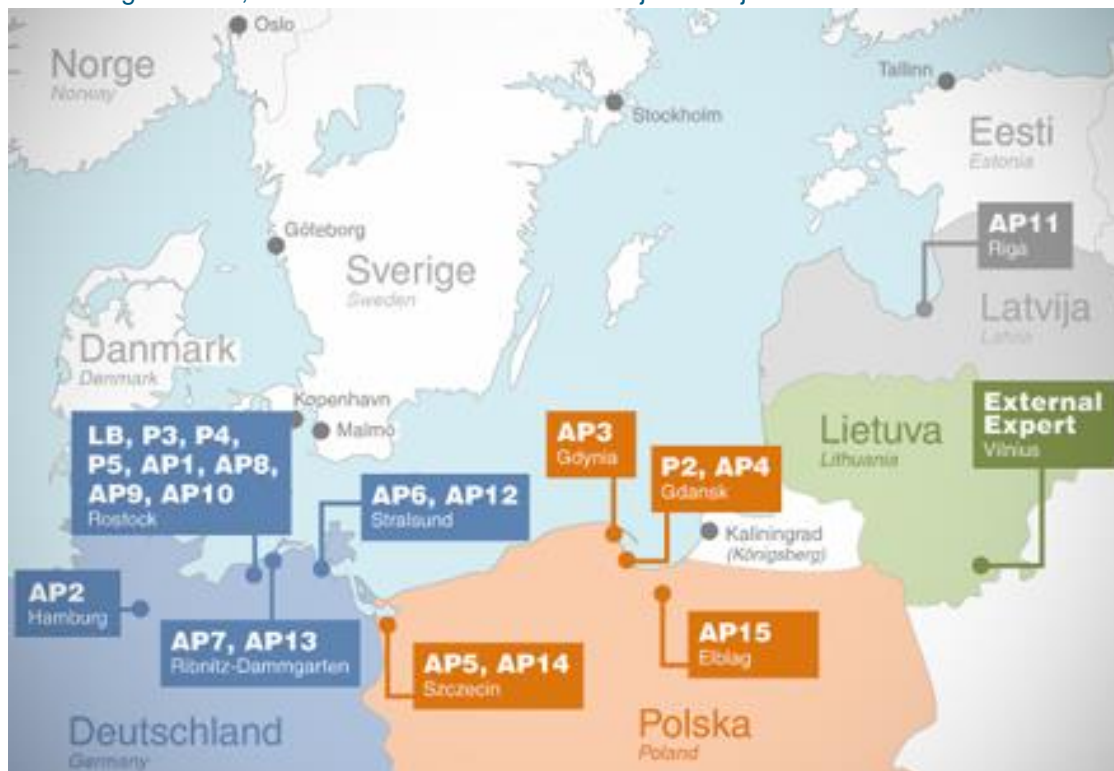
- Erosie: Het erosie-beeld van beide kleien is vergelijkbaar. Het zandgehalte is hierbij de belangrijkste parameter.
- Volumekrimp: Geen significante verschillen tussen de klei soorten wat betreft volumekrimp. Dit geldt voor de verticale component (klink) en de horizontale component (scheurvorming). De belangrijkste parameter hiervoor is de rijpingsfactor (n-factor). Voor bepaling van de rijpingsfactor zie het begin van deze paragraaf en ook paragraaf 4.3. Scheurvorming is echter wel waargenomen in het proefvak hulpkade, wat werd toegeschreven aan het gebruik van niet volledig gerijpte klei (n=0,75, terwijl in de andere proefvakken klei met n=0,5 werd toegepast).
- Begroeiing: Hier zijn duidelijke verschillen geconstateerd. Bij Hoek van Holland werd door een hoger zoutgehalte in het poriënwater bij Euroklei een tragere groei van het gras geconstateerd. Met name in het eerste jaar was er een groot verschil, dat in de jaren daarna wel weer bijtrok. Bij Streefkerk groeide het gras bij de Euroklei juist beter dan bij de traditionele klei en dat werd veroorzaakt door een hoger gehalte organische stof en kalk.
- Ontziltig: Op het gebied van ontziltig is weinig gemeten, maar hier is wel gebleken dat de mate van ontziltig niet alleen invloed heeft op de snelheid van het ontstaan van een goede grasmat, maar ook invloed heeft op de mate krimpen en zwellen van de klei. Interessant is dat in de beoordeling van Euroklei het zoutgehalte niet relevant werd geacht voor de beoordeling van klei als kernmateriaal, terwijl voor de toplaag een maximumwaarde van 4 g/L NaCl werd geadviseerd.

Gerard Kruse (voormalig Deltares-medewerker) heeft nog een aantal persoonlijke aandachtspunten gegeven die niet direct in literatuur zijn teruggevonden:

- Drogen van de baggerspecie gebeurde in spoelvelen waarin de specie op een zandondergrond werd aangebracht. Het ruimtebeslag werd als mogelijk probleem gesignaleerd, maar oplosbaar geacht.
- In 1990 is een rapport opgesteld over het ontwateren van baggerspecie op basis van literatuuronderzoek waarin opmerkingen staan over het drogen aan de lucht. Daarin wordt genoemd dat een 1.0 m dikke laag baggerspecie (w_n 250 %) in 2 tot 3 jaar drogen tot $w_n = 40$ % en een laag van 1.5 m dik tot beneden de vloeigrens in 2 tot 3 jaar (gebaseerd op ervaringen in Verenigde Staten, in klimaatzones met een gematigd klimaat). Opgemerkt wordt dat de Euroklei een veel hoger zandgehalte heeft (in Streefkerk is bij de proefdijk een zandgehalte van 28,5% beschreven [89]) dan genoemd voor de baggerspecie van de Eems-Dollard.
- Uit de praktijk van het werken met klei en met baggerspecie blijkt dat voor het drogen het beheersen van de grondwaterstand van groot belang is evenals het voorkomen van staand water op de klei. In de initiële fase kan een discussie over een trekker nuttig zijn om drainage voren te trekken. Als er een korst is gevormd is dat niet meer relevant. Verwijderen van de gedroogde toplaag versnelt het ontwateren aanmerkelijk evenals het omzetten van de gehele dikte van de specie- / kleilaag. Hemelwater wordt door de kluitenstructuur van omgezette klei / specie effectief afgevoerd.

4.5 DredgDike

DredgDike is een uitgebreid onderzoeksprogramma gefinancierd door de EU. Het is een samenwerking van universiteiten en kennisinstituten langs de zuidzijde van de Oostzee. Met name Duitse en Poolse organisaties, maar ook Letland en Litouwen zijn hier bij betrokken.



Figuur 16: Overzicht van deelnemers aan het DredgDike-project. Bron: www.dredgdike.eu

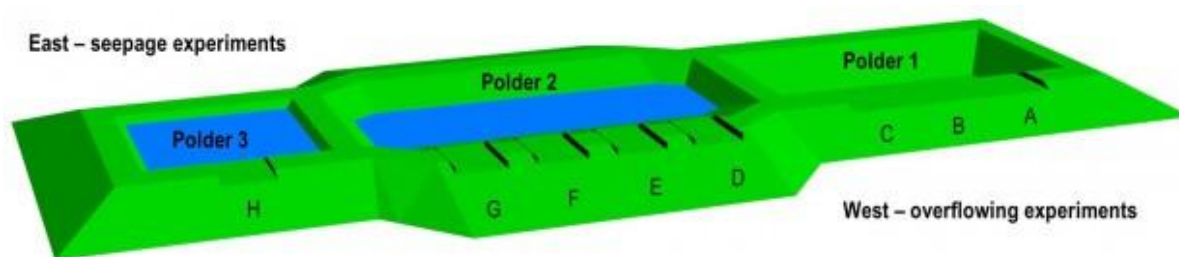
Het DredgDikes-project heeft tot doel om baggerspecie te gebruiken in dijklichamen. Hiervoor zijn Large-scale pilots uitgevoerd.

Projecten die zijn uitgevoerd:

- Rostock (Duitsland);
- Gdansk (Polen);
- Körkwitzer Bach (Duitsland).

4.5.1 Rostock, Duitsland – testdijk DredgDikes

In Rostock is een testdijk aangelegd waarin het gebruik en gedrag van gebaggerd materiaal in een dijk wordt getest. De dijk in Rostock is aangelegd in de periode 2011-2012 en bestaat uit twee parallelle dijken verbonden door 3 dammen. Hierdoor ontstaan 3 polders, zie figuur 17. Door water in de polders te pompen krijgt de dijk een waterkerende functie. In 2013 en 2014 zijn verschillende experimenten en onderzoeken aan en op de dijk uitgevoerd. In de dijk is materiaal gebruikt uit onder andere de METHA-Anlage in Hamburg.



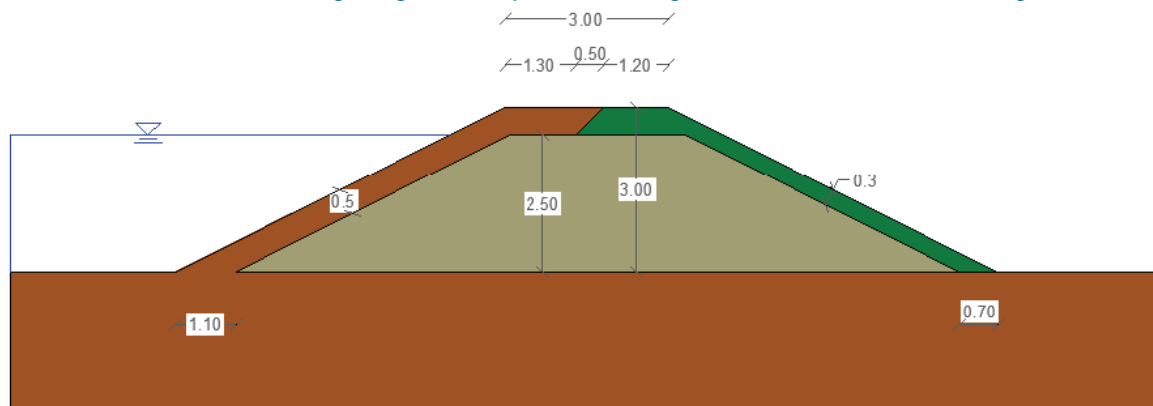
Figuur 17: Testdijk Rostock (DredgDike)



Figuur 18: Foto testdijk Rostok (DredgDike)

4.5.2 Gdansk (Trzcinsko), Polen

Nabij Gdansk in Polen is in 2012 een testdijk in het kader van het EU-project DredgDikes aangelegd. De 3 meter hoge dijk is opgebouwd uit 70% as en 30% zand uit de Vistula Rivier. Het dijklichaam is afgedekt met een 0,5 meter dikke laag vliegas. De dijk is vooral ingezet voor erosie, kwel en vegetatie metingen.



Figuur 19: Opbouw testdijk Gdansk (DredgDikes-project)

Tabel 8: Parameters materialen testdijk Gdansk (DredgDikes-project)

Materials		CLAY	TEFRA	MIXTURE
Unit Weight	γ [kN/m ³]	18	16	13
Saturated Unit Weight	γ_{sat} [kN/m ³]	21	20	16,3
Permeability coefficient	k [m/s]	1 e -7	1 e -7	1 e -3
Void Ratio	e [-]	0,79	0,64	0,69
Undrained shear	c_u [kPa]	50	30	-
Effective cohesion	c' [kPa]	30	50	5
Effective friction	ϕ' [°]	25	20	37
Young's Modulus	E [kPa]	15 000	30 000	22 500
Poisson's Ratio	ν [kPa]	0,35	0,30	0,25



Figuur 20: Foto testdijk Gdansk (DredgDike)

4.5.3 Körkwitzer Bach, Duitsland

In Körkwitzer Bach nabij Ribnitz-Damgarten, 30 km ten noordoosten van Rostock is ook een testdijk aangelegd. Het betreft een lineaire dijk. De dijk is voorzien van meetinfrastructuur om de vervorming tijdens en na de constructie en om kwel na constructie te meten. Daarnaast zullen aspecten als de vegetatiegroei en -worteling, scheurvorming in de toplaag, schade door flora en fauna worden bestudeerd. Het monitoren gaat in iedere geval tot vijf jaar na constructie door.

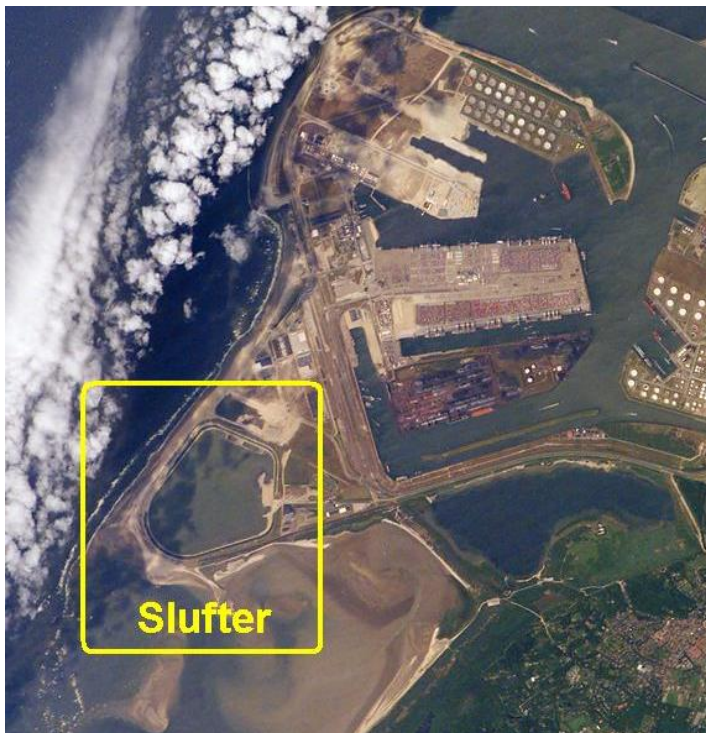
Bevindingen onderzoek

Er zijn zeer veel onderzoeken verricht die variëren van overslag, microstabiliteit, tot uitgebreide materiaaleigenschappen, vegetatie op de dijk, uitspoeling van zout, maar ook juridische aspecten gebruik van geotextielen en geotubes en veel meer. Hieronder staan de bevindingen van het DredgDikes-project tot en met 2014 die het meest relevant zijn voor het project Kleirijperij. Ze zijn gerapporteerd in een gebundeld document bestaande uit verschillende artikelen [20]:

1. Er is veel verschil in parameters van het gewonnen baggermateriaal. Niet alleen verschil per winlocatie, maar ook verschil bij winning op de zelfde locatie een jaar later.
2. Er zijn veel laboratoriumtesten gedaan waarin verschillende verbanden zijn gelegd tussen parameters. Ook zijn verschillende testmethodes vergeleken.
3. De hoeveelheid uitspoeling van zout neemt toe bij:
 - meer penetrerende neerslag;
 - minder onttrekking van water door planten.
4. De uitspoeling van zoutionen is hoog, maar zware metalen, fosfor en stikstof spoelen bijna niet uit.
5. Uit de laboratoriumonderzoeken blijkt dat een mengsel van zand met vliegias een veelbelovend materiaal is, maar niet zo eenvoudig in zijn fysieke gedrag te voorspellen is. Hier zal aanvullend onderzoek naar moeten worden gedaan.
6. Ondanks de aanzienlijke hoeveelheid scheuren en muiscaten die voorkomen in het materiaal van de dijkbekleding, toonde de testen aan dat de dijk stabiel bleef en er geen toename van kwel was.
7. Er zijn overslagproeven gedaan om de grasbekleding te testen. Er is getest tot een overslagdebiet van ruim 200 l/s/m, maar hierbij bleef de grasmat in tact.
8. Er is geëxperimenteerd met het toevoegen van ongebluste kalk (calciumoxide of hydroxide). Dit wordt voor stabilisatie voor de aanleg van wegen, snelwegen, spoorwegen en platforms vaker gebruikt.

4.6 Slufter (Haven Rotterdam)

De Slufter is een grootschalige opslagplaats voor vervuild slib in het zuidwestelijke deel van de Rotterdamse Maasvlakte aan de Noordzeekust bij Voorne. De aanleg vond plaats in 1986 en 1987. Het depot is in eerste instantie bestemd voor de berging van verontreinigde baggerspecie, vrijkomend bij het reguliere onderhoudsbaggerwerk in de vaargeulen naar en in de havenbekkens van de haven van Rotterdam, alsmede uit baggerwerk in de overige vaargeulen van de Rijn-Maasmonding.



Figuur 21: Luchtfoto Slufter (Haven Rotterdam)

Er zijn binnen het project Slufter 2 interessante onderzoeken gedaan:

1. De verandering van de Atterbergse grenzen door rijping;
2. Het rijpen van baggerspecie middels een sandwich-constructie.

4.6.1 Verandering van de Atterbergse grenzen

In een onderzoek dat is gerapporteerd door DWW (Dienst Weg en Waterbouw van Rijkswaterstaat) in 1997 [77] zijn de Atterbergse grenzen van baggerspecie uit de Slufter bepaald in verschillende fases van rijping. Hier zijn de volgende constatering gedaan:

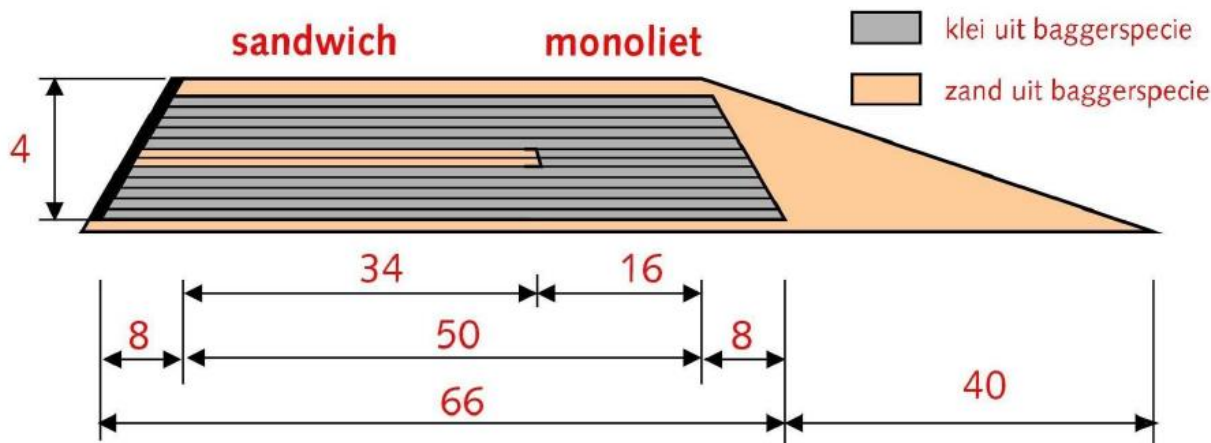
1. Door rijping is de vloeigrens van het materiaal sterk gedaald (dit is volgens het onderzoek in overeenstemming met informatie uit niet nader genoemde literatuur);
2. De uitrolgrens is nagenoeg niet veranderd (verwachting was dat deze iets zou stijgen).

4.6.2 Dijk aanleg met sandwich-constructie

In het kader van de stimulering van verwerking van baggerspecie c.q. besparing depotvolume, is in 2003 en 2004 door Rijkswaterstaat Directie Zuid-Holland en het Havenbedrijf Rotterdam praktijkonderzoek gedaan naar diverse toepassingsmogelijkheden van producten uit baggerspecie. Het laten rijpen van baggerspecie in rijpingsdepots is een van de technieken die hier beproefd is. Hierbij bleek het behalen van de vereiste consistentie veelal het grootste probleem. De gebruikte klei had een consistentie-index van circa 0,6.

De samenstelling van de specie en de weersomstandigheden bepalen namelijk in belangrijke mate de snelheid van het rijpingsproces. Het verwerken van specie (klei) met een lagere consistentie in ophogingen zou dan een optie zijn maar geeft uitvoeringstechnisch en constructief de nodige problemen. Om dit te ondervangen is een zogenaamde 'sandwich-constructie' bedacht welke afwisselend uit klei- en zandlagen bestaat. De zandlagen dienen voor extra stevigheid tijdens de uitvoering, een snelle klink en het afvoeren van eventueel overtollig water.

Om deze aspecten te beproeven is in de periode 25 maart t/m 23 mei 2003 bij de Slufter een ruim 4 m hoge ophoging met een oppervlak van circa 65 x 65 m² aangelegd. Als vergelijking is 2/3 deel opgebouwd uit klei en zand (sandwichdeel) en 1/3 deel alleen uit klei (monolietdeel). Op het maaiveld is eerst een zandbed onder dakprofiel aangelegd. Vervolgens zijn 5 kleilagen van elk circa 0,3 m aangebracht en verdicht. In het sandwichdeel van de ophoging, is op de eerste 1,5 m klei een laag zand van 0,5 m aangebracht. In het monolietdeel zijn hiervoor in de plaats 2 kleilagen aangebracht. Tot slot zijn weer 5 lagen klei aangebracht en als afdekking van de constructie dient een 0,5 m dikke zandlaag en een 0,2 m dikke laag teelaarde. Zie ook figuur 22.



Figuur 22: Opbouw sandwich-constructie met zand en klei gemaakt uit Baggerspecie (bron: [90])

Tijdens het aanbrengen van de laatste kleilagen zijn de voordelen van de sandwich-laag duidelijk naar voren gekomen. Op het monolietdeel van de ophoging was de klei nauwelijks meer te verwerken, terwijl dit op het sandwichdeel nog wel mogelijk was. Alhoewel de aanlegperiode als relatief droog moet worden omschreven, hebben de enkele regenbuien die tijdens de uitvoering zijn gevallen niet of nauwelijks tot oponthoud geleid. Hiermee is een groot aantal doelstellingen van het oorspronkelijke onderzoeksplan beantwoord.

In de metingen die volgden is gebleken dat het rijpingsproces met de tussenzandlaag werd versneld en dat de materiaal- en sterkte-eigenschappen nauwelijks anders waren dan bij een eerder kleirijpingsproject zonder sandwich-constructie. Ook de zakbaak-metingen gaven aan dat het inklinken bij de sandwich-constructie sneller ging dan bij het monoliet deel. Deze gemeten parameters zijn weergegeven in tabel 9.

Tabel 9: Gemeten materiaal- en sterkte-eigenschappen baggerspecie. Gemeten is voor en na aanleg en in de laatste kolom is een vergelijking gemaakt met een proef uit 1995. (bron: [91])

Parameter	eenheid	Sandwichconstructie		Ophoging 1995
		voor aanleg	na aanleg	
vloeigrens	% (m/m)	92	n.v.t.	86
uitroigrens	% (m/m)	36	n.v.t.	39
watergehalte	% (m/m)	58	54	50
consistentie-index (Ic)	-	- 0,6	- 0,7	- 0,8
organische stof	% (m/m)	7	n.v.t.	6
kalk (CaCO ₃)	% (m/m)	17	n.v.t.	16
zoutgehalte	g/l bv	10	n.v.t.	15
> 63 µm (zand)	% (m/m)	13	n.v.t.	18
< 16 µm	% (m/m)	50	n.v.t.	60
< 2 µm (lutum)	% (m/m)	26	n.v.t.	31
nat volumiek gewicht	kg/m ³	1600	1600	1630
droog volumiek gewicht	kg/m ³	1010	1040	1100
hoek inwendige wrijving (ϕ') ¹⁾	°	30	31	28
effectieve cohesie (c') ¹⁾	kN/m ²	6	1	9
ongedr. schuifsterkte f_{undr} ²⁾	kN/m ²	27	16	27
elasticiteitsmodulus E_{50} ²⁾	MN/m ²	12	4	11
samendrukkingconstante (C)	-	31	22	29
samendrukkingconstante (C')	-	9	9	23
grensspanning (P_x)	KN/m ²	26	27	33
consolidatie coëfficiënt (c_v)	m ² /s	6,2E-09	6,5E-08	7,8E-08
1) ϕ' en c' zijn gegeven bij een deformatie van 2%				
2) f_{undr} en E_{50} bepaald bij de eerste belastingtrap van 25 kN/m ²				

4.7 Dijkmateriaal uit baggerspecie, Haven van Hamburg

In de Haven van Hamburg zijn verschillende projecten uitgevoerd met baggerspecie. Een aantal projecten zijn specifiek interessant en een aantal projecten gaan ook verder met het resultaat van het vorige project.

4.7.1 Mechanisch scheiding van havensediment (METHA-Anlage)

In Hamburg wordt gebaggerd materiaal verwerkt via de grootschalige METHA-Anlage. Hier wordt zand en fijnzand van de silt/kleifracie gescheiden, de baggerspecie gespoeld om het te ontzouten en vervolgens ontwaterd. Door het geïndustrialiseerde proces kan de kwaliteit van het eindproduct worden beïnvloed. Jaarlijks wordt ca 550 000 ton baggerspecie (na drogen ca 1 000 000 m³) verwerkt.



Figuur 23: Ligging METHA Anlage Hamburg, overpompen van baggerspecie naar de verwerkingsite (bron: Filmförderung Hamburg Schleswig-Holstein) en membraankamerfilterpers in de METHA Anlage (bron: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe)

Als gevolg van hoge kosten en ecologische beperkingen is het materiaal van de METHA Anlage beperkt toepasbaar als natuurlijke bouwstof. Het vrijkomende verontreinigde fijne materiaal wordt voornamelijk afgevoerd naar twee speciaal aangelegde kleigaten/kleidepots. De niet-verontreinigde fijne fractie kan beperkt worden toegepast als afdekklei van dijken en afdeklagen. Het vrijkomende zand is geschikt als onder andere drainagezand.

Technische gegevens

- Jaarlijks ca 550 000 ton baggerspecie (na drogen ca 1 000 000 m³).
- Industrieel proces om baggerspecie te verwerken, in verschillende stappen wordt het materiaal op korrelgrootte gescheiden. De fijne fractie wordt na bezinking verder ontwaterd via óf een membraamfilterpers óf door een zeefband- en hoge druk pers.
- Door het geïndustrialiseerde proces kan de kwaliteit van het eindproduct worden beïnvloed.

4.7.2 Spoelvelden

Er zijn in het Havengebied spoelvelden aangelegd. Hierin wordt het materiaal ontzilt en ontwaterd. Deze velden lijken qua opzet veel op hoe de kleirijperij er uit gaat zien, maar zijn qua opzet veel groter dan de kleirijperij. Helaas is er geen data gevonden in de literatuur van de spoelvelden.



Figuur 24: Spoelveld Moorborg-Mitte in het havengebied van Hamburg

4.7.3 Testdijk Getijdgebied Elbe, Duitsland

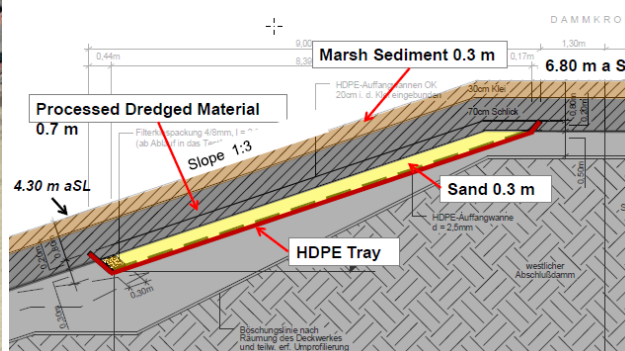
In 2004 is in het getijdgebied van de Elbe een testdijk aangelegd waarmee de geschiktheid van klei uit de METHA-anlage voor dijkbekleding is getest. De testdijk bestaat uit twee dijkdelen:

1. Standaarddijkopbouw (zandkern met standaard kleidek). Het kleidek bestaat uit een 1 meter dikke kleilaag.
2. Standaarddijk waarbij het kleidek is vervangen door 70 cm dikke METHA-sliblaag en afgedekt met 30 cm dijkenklei.

Beide dijken zijn volgens hetzelfde principe gebouwd: De dijk heeft een verhouding van 1:3. Bij de aanleg is gebruik gemaakt van rupsvoertuigen en walsen om de dijk te verdichten. Onder het kleidek ligt een HDPE-drainagebuis waarin het water dat eventueel door het kleidek komt wordt afgevangen. Een jaar na aanleg is er nog geen water opgevangen in de drainagebuis.



Figuur 25: Locatie Testdijk (bron: [36])



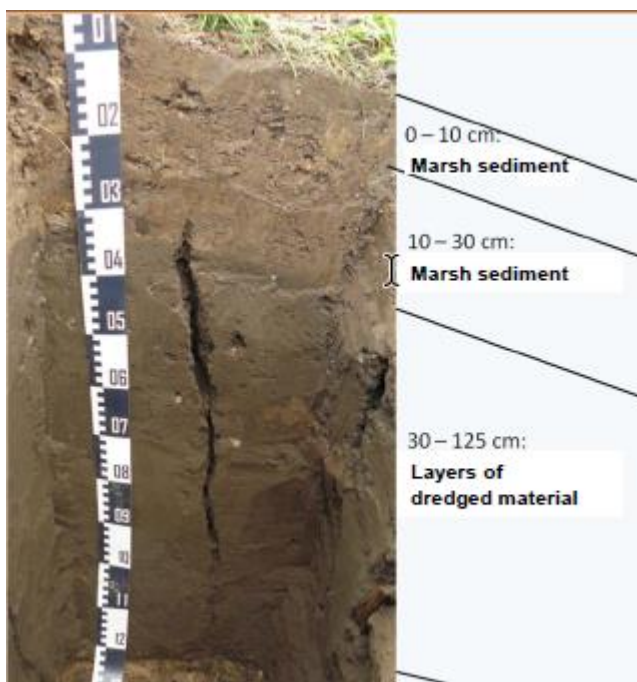
Figuur 26: Testdijk met METHA-slib

In beide dijken is op drie verschillende diepten metingen verricht naar de grondsificaties. De resultaten hiervan staan in onderstaande tabel.

Tabel 10: Eigenschappen testdijken langs de Elbe Bron: [36]. (Er zijn geen metingen beschikbaar over emissies van andere zware metalen en andere parameters uit het METHA-slibdek)

	Klei	Dredged material
Bodenart	Lt3	Ls3
k_f [m/s]	$6.3 \cdot 10^{-10}$	$1.7 \cdot 10^{-9}$
pH _{H2O}	6.4	7.6
TOC [%]	1.9	4.3
Zn [mg/kg]	94	600
Cu [mg/kg]	31	128
Cd [mg/kg]	0.24	4.2
TBT [μ g/kg]	1.5	854
EC [μS/cm]	120	660
Sulfat [mg/l]	14	249
Water content [% DM]		60

De dijk met de gebruikte sliblaag heeft gedurende de onderzoeksjaren de belastingen goed kunnen weerstaan. Aan het eind van het onderzoek is de dijk afgegraven. Het bleek dat er in de sliblaag krimpscheuren zaten die doorliepen tot de grens met de niet-slib bekleding.



Figuur 27: Locatie Testdijk (bron: [36])

4.8 Interessante projecten met beperkte informatie

Naast de hierboven genoemde projecten is ook een aantal projecten gevonden die erg interessant lijken, maar waar onvoldoende informatie van boven tafel is gekomen om mee te nemen in deze literatuurstudie. Mogelijk dat op een later moment deze informatie wel beschikbaar komt en kan worden geanalyseerd. De projecten staan hieronder kort beschreven.

4.8.1 Rostock – Spoelvelden/Rijpingsvelden (Spülfelder Rostock)

In de deelstaat Mecklenburg – Vorpommerns komt jaarlijks ca 100 000 tot 150 000 m³ natte baggerspecie vrij bij baggerwerkzaamheden. Om deze baggerspecie te kunnen verwerken tot grond- en bouwstoffen zijn nabij Rostock twee sites ingericht waar de baggerspecie grootschalig kan rijpen [1] [2].



Figuur 28: Ligging rijpvelden Rostock

Technische gegevens spoelvelden

- Totaal oppervlakte van circa 110 ha;
- Jaarlijks kan 200 000 m³ baggerspecie worden verwerkt;
- Twee complexen met elk 5 bezinkdepots en 2 rijpvelden;
- Het rijpen duurt ca 1 à 2 jaar (afhankelijk van de gevolgde drainage en bewerkingsmethode);
- Er zijn spoelinstallaties aanwezig waardoor de oxidatie van organisch stof kan worden gereguleerd. Tevens kunnen via de spoelinstallaties additieven aan de baggerspecie worden toegevoegd;
- Na scheiding wordt het materiaal onder andere gebruikt als bodemverbeteraar in de landbouw, als materiaal voor drooglegging en voor pilotprojecten van de universiteit van Rostock (→ onder anderen Dredgdike).

4.8.2 Bremen – Ontwateringsvelden

Jaarlijks komt in Bremerhaven circa 300 000 m³ sediment vrij. Dit sediment bestaat voornamelijk uit kleiig slib dat verontreinigd is met zware metalen en tributyltin (TBT). De gebaggerde baggerspecie wordt in 16 baggerspeciedepots verwerkt. Het proces in deze depots is zo ingericht dat de baggerspecie binnen een jaar voldoende is ontwaterd en gerijpt om verder te worden verwerkt. Tijdens het ontwateren en rijpen wordt de baggerspecie regelmatig omgezet met een “Mietenumsetzer”. De meest verontreinigde slib wordt na ontwatering en rijping gestort in een speciaal daarvoor aangelegde stortplaats. Voor het deel dat milieuhygiënisch wel geschikt is voor toepassing als bouwstof wordt een nuttige toepassing gezocht [51].



Figuur 29: Ligging Ontwateringsvelden Bremerhaven en foto van ontwateringsvelden (born: www.Bremenports.de)

Technische gegevens

- 16 rijpingsvelden/depots met een omvang van 200 x 100 m en een maximale baggerspeciehoogte van 2,6 m;
- rijping moet binnen een jaar in verband met nieuwe aanvoer van baggerspecie;
- vanwege het geringe zandgehalte ten opzichte van Rostock in de Bremerbaggerspecie vindt natuurlijke bezinking van grovere fracties minder plaats dan in Rostock;
- de depots in Bremen zijn gedraineerd;
- om rijping te versnellen wordt de baggerspecie regelmatig omgezet met een “Mietenumsetzer”.

4.8.3 Dijk Ellerholzkanal, Hamburg, Duitsland

Bij het Ellerholzkanal nabij Hamburg zijn twee proefdijkvakken aangelegd om de effecten van baggerspecie in dijkconstructies op het milieu te testen [1]. De test bestond uit het bemonsteren van het percolaatwater uit beide dijken. De ene dijk heeft een standaard dijkconstructie van een zandkern met kleidek. In de andere dijk is de 30 cm dikke toplaag van het kleidek vervangen door baggerspecie.

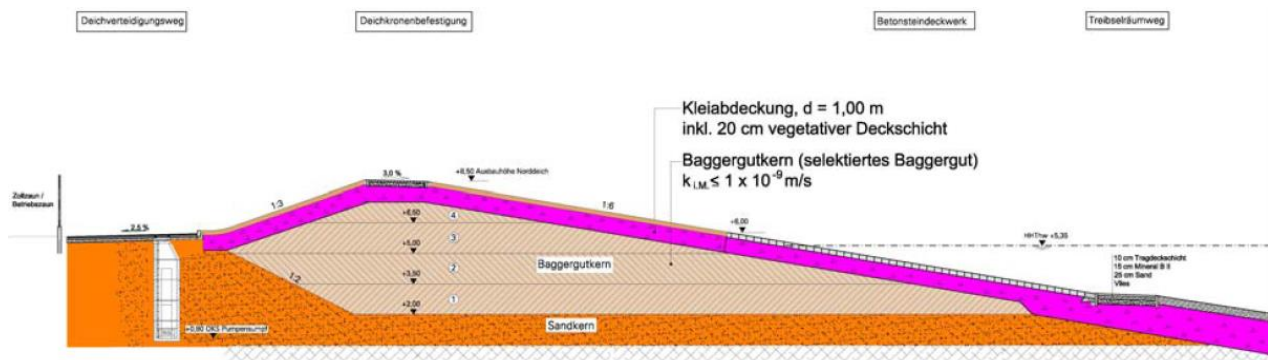
4.8.4 Bremerhaven, Duitsland

Voor de groei van de containerterminal in Bremerhaven is in 2005 een 900 meter lange dijk aangelegd waarbij de oorspronkelijke kern van zand is vervangen door een kern van gebaggerd materiaal uit Bremerhaven. Voor toepassing in de dijk kern is het materiaal gerijpt. In 2005 is in het circa 300 meter lange noordelijke dijkdeel 35 000 m³ baggerspecie verwerkt [1] [4].



De kwaliteit van de baggerspecie is voor toepassing bepaald en getoetst aan de Duitse normen. Hieruit bleek dat de baggerspecie valt in de LAGA-klasse Z 1.2 [119]. Uit de emissieproeven blijkt dat het eluaat, op zoutgehalte (als elektrische geleidbaarheid, EC), chloride en sulfaat na, voldoet aan de LAGA Z0-norm. Gezien het toepassingsgebied (brak milieu) zijn de verhoging van EC, chloride en sulfaat toelaatbaar. Uit de Weißmann test blijkt dat de baggerspecie voldoet aan de voorwaarden voor (Duitse) dijkneklei. Op basis van deze proeven is bepaald dat de klei in een laagdikte van 40 cm toegepast mag worden in de dijk bij Bremen.

Bij aanleg is de baggerspecie verdicht met een rupsvoertuig. Ondanks het oorspronkelijke hoge watergehalte wordt een DPr van 88% gehaald. De door de laboratoriumtest vastgestelde schuifsterkte is gemiddeld ongeveer $\tau_{FS} = 47 \text{ kN/m}^2$. Na toepassing zal deze schuifsterkte teruglopen naar ongeveer 33 kN/m², het watergehalte zal dan ongeveer 53% zijn.

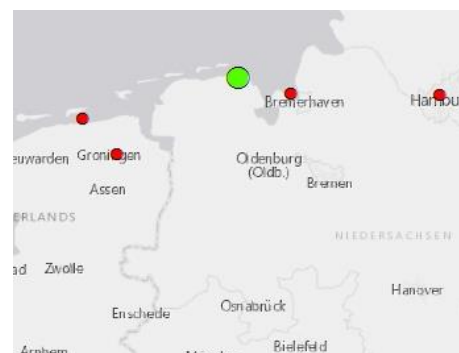


Figuur 30: Doorsnede dijk bij Bremen [1]

4.8.5 Maededeich, Duitsland

Voor de versterking van bestaande dijken zijn van juni tot oktober 2001 twee proeven gedaan met het gebruik van baggerspecie voor dijkversterking [1].

De twee proeven bestaan uit dijkdelen die volledig geïntegreerd in de bestaande dijk liggen en hebben dezelfde geotechnische constructie als de rest van de dijk, een zandkern afgedekt met kleidek. Voor de kleilaag is gebruik gemaakt van baggerspecie uit Hamburg (METHA) en Bremen (Bremen-Seehausen). De baggerspecie is in een 1 meter dikke laag direct op de zandkern aangebracht, vervolgens verdicht en afgedekt met een kleilaag van 0,25 m.



De baggerspecie kenmerkt zich door een grote homogeniteit, een hoge plasticiteit en afwezigheid van krimp na drogen. Over het geheel genomen was baggerspecie makkelijker te verwerken dan de klei die in de afdeklag is toegepast.

Voorafgaand aan toepassing is de kwaliteit van de baggerspecie aan de Duitse toepassingsnormen getoetst. Hieruit blijkt dat met uitzondering van sulfaat alle parameters voldoen aan de hergebruiksklasse en dat voor veel parameters zelfs geen overschrijding van de O-norm is gemeten.

Uit proeven na aanleg blijkt dat er geen emissie van verontreiniging uit de baggerspecielaag naar onderliggende lagen optreedt. Ook in de vegetatie op de dijk zijn geen verhoogde gehalten aan zware metalen of andere verontreinigende stoffen aangetoond [1].

4.8.6 Compartimenteringsdijk Vlassenbroek, België

In Vlassenbroek (Dendermonde, België) is een 800 meter lange compartimenteringsdijk aangelegd waarbij nagenoeg volledig gebruik is gemaakt van baggerspecie. Om het dijkmateriaal de juiste eigenschappen te geven is gebruik gemaakt van toeslagstoffen (cement, vliegashoudend cement, kalk, ...). Deze toeslagstoffen zijn vooraf getest, maar hier ontbreekt informatie over.

Het materiaal waarmee gestart is:

- Droge stofgehalte: 65,8 %
- Watergehalte: 52,3 %
- Dichtheid: 1,65 ton/m³
- Organische stofgehalte: 3,7 %
- Deeltjesgrootteverdeling:
 - Zand: (63µm - 2mm) 61,5 %
 - Silt: (2µm - 63µm) 24,4 %
 - Lutum: (<2µm) 14,1 %
- Plasticiteitsindex (Ip) 11,5 %
- Ongedraineerde Schuifsterkte (cu) 0 kPa

Eigenschappen van het eindmateriaal:

- Doorlatendheid (k_f): 10^{-7} m/s
- Ongedraineerde schuifsterkte (cu): 35 kPa
- Hoek van inwendige wrijving (φ): 25 °
- Cohesie (c): 4 kPa



Figuur 31: Luchtfoto van opgeleverde compartimenteringsdijk Vlassenbroek (najaar 2013)

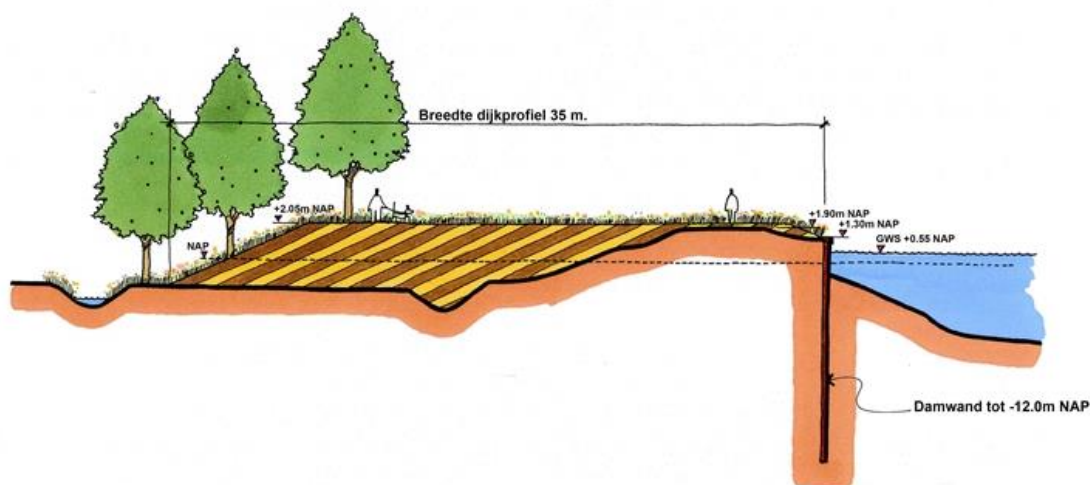
De aannemer die het werk heeft uitgevoerd is: Evisan (dochteronderneming van baggeraannemer Jan de Nul). De informatie is gebaseerd op een artikel met onbekende datum in het blad Grond/Weg/Waterbouw [15] en een artikel uit het DredgDike-project [20].

4.8.7 Versterking Delflandse Dijk (Hoek van Holland-Maassluis)

Versterking van een deel van de Delflandse Dijk tussen Hoek van Holland en Maassluis vond plaats in 1997. Dit gebeurde met behulp van kleiachtig materiaal, ontstaan uit gerijpte baggerspecie en zand uit zandscheiding. De baggerspecie is afkomstig van het Hoogheemraadschap van Delfland en is gerijpt in verschillende doorgangsdepots. Het toegepaste zand kwam uit een mobiele zandscheidingsinstallatie (hydrocyclonage) op de Slufter. Het zand is per schip naar de Delflandse Dijk verscheept en onderweg door middel van spoelen ontzilt. De verschillende betrokkenen kijken met genoegen terug op dit project. De beschikbare informatie komt uit het boekje Bouwen met Baggerspecie [32].

4.8.8 Gamerwolde, Nederland

Voor de aanleg van het Dijkpark Ten Boer wordt tussen Woltersum en de Bronssluis de kade van het Eemskanaal Noordzijde verbreed en worden delen van het gebied tussen het Eemskanaal en het Damsterdiep opgehoogd met zand en baggerslib. Hiervoor wordt gedroogde bagger uit het Damsterdiep toegepast. Het baggeren is in 2015 uitgevoerd. De ontwikkeling van het dijkpark is in 2016 gestart.



Figuur 32: Principe-profiel toepassen baggerspecie dijkverbreding Gamerwolde

4.8.9 Noordzeekustvlakte, Nederland en Duitsland

Bezinkingsvelden worden aangelegd op al aanwezige wadplaten of slikken. Gedurende hoogtij bezinken minerale en organische deeltjes uit het zeewater op deze wadplaten en slikken en vormen een nieuw laagje. Langzaam worden de platen/slikken hoger en treedt er vegetatie-ontwikkeling op. De wadplaten/slikken veranderen daarmee in kwelder/schorren. Dit zijn gebieden die alleen tijdens hogere waterstanden onder water komen.



Figuur 33: Geografische ligging slikken Waddenzee en foto van slik in de Waddenzee (bron: Waddenzeeschool.nl)

Vanuit de Projectoverstijgende Verkenning Waddenzeedijken (POV Waddenzeedijken, www.pov-waddenzeedijken.nl) is verkend in hoeverre klei uit de kustvlakte kan worden ingezet voor dijkversterking en wat dit betekent voor de natuur in het kleiwingebied. In 2015 is een excursie georganiseerd naar Elisabethgroden in Duitsland⁹. De zoute kwelders van de Elisabethgroden vormen naast natuurgebied en het leefgebied voor vogels en insecten ook een potentieel reservoir van dijkklei. In het Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer, op de Jadenbusen, zijn verschillende kleiwinputten aanwezig waaruit klei voor dijken wordt gewonnen. Op de oudste afgraving (2012) was na drie jaar de eerste pioniersvegetatie (zeekraal) aanwezig. Voor een groot gedeelte langs de Duitse kust geldt dat na kleiwinning feitelijk geen sprake meer is van échte kwelderbegroeiing. Het duurt minimaal 10 tot wel 40 jaar voordat de oorspronkelijke natuur en het leefgebied zich heeft hersteld, maar dit is sterk afhankelijk van de mate van aanslibbing. Vanwege de effecten op de natuur heeft het niet de voorkeur om klei te winnen uit de kwelders, tenzij daarmee op andere manieren de natuurwaarde kan worden versterkt.

⁹ Excursieverlag "Excursie Elisabethgroden, POV Waddendijken, 11 februari 2015" en presentatie "Rechtlicher Rahmen und Naturschutzfachliche Kriterien für einen Bodenabtrag im Deichvorland des Nationalparks, Willemshaven, 11 februari 2015"

5 Discussie en conclusies

Uit de bovenstaande evaluatie blijkt –niet verrassend- dat het rijpen van klei veel is toegepast in behoorlijk grootschalige projecten, die belangrijke input geven voor de Kleirijperij. In dit hoofdstuk wordt een relatie gelegd tussen de beschreven theorie en praktijk, en wordt de beschreven kennis gekoppeld aan de uitvoeringsplannen en randvoorwaarden van de Kleirijperij [102]. Daarbij worden achtereenvolgens i) de relatie van de in detail beschreven projecten met de kleirijperij beschreven, ii) kansrijke strategieën beschreven en iii) informatie over relevante parameters samengevat, en iv) enkele kennishiaten beschreven. Tot slot v) wordt teruggeblikt op het proces van de literatuurstudie.

5.1 Relatie tussen cases en de kleirijperij

In diverse projecten wordt gebaggerd materiaal gebruikt om klei te maken en deze toe te passen in de dijken. Een overzicht van de projecten en relevante parameters is weergegeven in tabel 11.

Tabel 11: Vergelijking van verschillende cases

Case	Rijpingsdoel	Laaghoogte	Rijpingstijd	Zout of zoet slib	Bijzonderheden (toeslagstoffen, behandeling, vegetatie)
Lauwersmeer	Dijkverhoging	0,2 tot 1,0 meter	geen	Zout	Direct aanbrengen
Flevopolders	Inpoldering	n.v.t.	“lang”	Zout	-
Euroklei	Diversen (o.a. dijken)	1,0 meter	2-3 jaar	Brak	Behandeling in “grondfabriek”
DregdDike - Rostock	Dijken	Onbekend	Onbekend	Brak	-
DregdDike- Gdansk	Dijken	2,5 meter	Onbekend	Brak	-
DredgeDike- Korkwitzer	Dijken	Onbekend	Onbekend	Brak	-
Slufter	Dijk	1,5 meter	2-3	Brak	Sandwich-constructie
Hamburg	Dijken	0,3-1,3 meter	-	Brak	Slib van Metha-anlage

De motieven voor het maken van klei verschillen echter sterk van de Kleirijperij: met name bij Euroklei en het hergebruik van het slib uit de Metha-anlage in Hamburg is het vervuilde karakter de belangrijkste reden om het slib naar de kant te brengen en in te zetten voor dijkenklei. Aangezien met name anorganische vervuiling niet verdwijnt door rijping is de resulterende dijkenklei nog steeds vervuild wat de toepassingsmogelijkheden beperkt. Met name bij de afzet van Euroklei heeft dit een belangrijke rol gespeeld.

Bij andere beschreven projecten (met name de IJsselmeerpolders) is het motief juist de inpoldering. Daarmee zijn de gebruiksdoelen anders en dat wordt gereflecteerd in het type gegevens dat over de projecten wordt verzameld: juist de begaanbaarheid en de karakteristieken van de toplaag zijn van belang. De parameters die een rol spelen zijn echter zeer vergelijkbaar en daarmee goed inzichtelijk: mate van rijping (en daarmee begaanbaarheid en bewerkbaarheid) en zoutgehalte (ten behoeve van landbouw).

Tot slot is de wetgeving of ontwerpmethodologie een belangrijke parameter: waar de rapportage Klei voor Dijken [60] een belangrijk input vormt voor de parameters waaraan klei uit de kleirijperij uiteindelijk moet voldoen betekent dat automatisch dat aan de parameters watergehalte, zoutgehalte, organische stof, en Atterbergse grenzen aandacht wordt besteed, en deze parameters zijn ook te herleiden naar de functionele eisen waar dijken aan moeten voldoen (grasbekleding mogelijk maken, vormvast erosiebestendig, verwerkbaar, weinig scheurvorming). Met name het zoutgehalte is echter op veel plekken niet in beeld als juridische eis, en daarmee maar beperkt bekend: in de dijken bij het Lauwersmeer, maar ook bij dijkverhogingen in Duitsland met kwelderklei (Jadebusen), is over het zoutgehalte, en het verloop daarvan in de tijd maar weinig bekend.

5.2 Kansrijke rijpingsstrategieën

Op basis van de literatuurstudie en de randvoorwaarden die aan de kleirijperij komen een aantal kansrijke strategieën naar voren, en randvoorwaarden voor een goede toepassing. Deze worden hieronder besproken.

5.2.1 Begreppeling en drainage

Het afvoeren van water is van het grootste belang voor het –op tijd- welslagen van de kleirijperij. Daarvoor worden ofwel industriële maatregelen genomen (zoals bij de Metha-Anlage in Bremen, waar water uit het slib wordt geperst), of er worden maatregelen getroffen om het water zo efficiënt mogelijk af te voeren. Begreppeling en drainage wordt in diverse projecten toegepast en is een eenvoudige en doeltreffende techniek. Daarbij is wel van belang dat het depot (en de drainage) boven de grondwaterspiegel ligt. Drainage- en begreppelingsafstanden van 5-15 meter lijken het meest toegepast. Echte optimalisatie is grondtype afhankelijk, onder anderen omdat het afhankelijk is van het te bereiken scheurpatroon.

5.2.2 Omzetten

Omzetten van rijpend materiaal kan alleen als de consistentie daarvan voldoende is. Het werd onder andere toegepast bij Euroklei, waar gesproken werd van “op ruggen zetten”. De bewerkingsslag leidt tot steeds andere klei-delen die aan de lucht worden blootgesteld en daarmee kunnen rijpen.

5.2.3 Vegetatie

Over vegetatie is slechts beperkte informatie verkregen¹⁰. Het wateronttrekkende vermogen van planten wordt hierbij soms tenietgedaan door de verhoogde schaduwwerking, en doordat niet al het aan de grond onttrokken water ook daadwerkelijk verdampt, waardoor het in het systeem blijft. Vegetatie sluit uitgebreide bewerkingsstappen uit. Voor een goede vergelijking van de effecten van vegetatie is het wel van belang dat een eventueel vegetatie-vak kan worden vergeleken met een blanco-vak waarin zeer vergelijkbare bewerkingscondities voorkomen.

5.2.4 Laaghoogte

De laaghoogte varieert sterk in de verschillende velden, en het is evident dat rijping completer is bij kleinere laagdikte. De relatie tussen rijpingstijd en laaghoogte wordt op veel plekken genoemd, maar slechts beperkt gekwantificeerd. Alle proeven waarbij in relatief korte tijd materiaal werd opgebracht (enkele jaren), hadden een maximale laagdikte van ca 1,5 meter.

¹⁰ In het separate onderzoek in relatie tot biologische bewerkingsmethodes komt dit in meer detail aan de orde

Voor relatie tussen laaghoogte en rijpingstijd is in de jaren tachtig de volgende relatie voorgesteld [103]:

$$t_{rijping} \sim H^{1,5}$$

De relatie geeft aan dat bij een verdubbeling van de laaghoogte, de rijpingstijd met een factor 3 omhoog gaat. Over het toepassingsbereik van deze relatie is te weinig bekend, om te weten of hij ook bij de kleirijperij toepasbaar is, maar het is duidelijk dat laagdikte een belangrijke te variëren parameter is.

5.2.5 Consolidatie- en rijpingstijd

De tijd om goed te consolideren en te rijpen hangt af van de snelheid waarmee ontwatering kan plaatsvinden en is dus slibafhankelijk en omstandigheden afhankelijk. De meeste van deze omstandigheden worden in de onderliggende paragrafen behandeld. Een rijpingstijd van 2-3 jaar lijkt een haalbare periode om van slib tot klei te komen, zo blijkt uit de Euroklei ervaring. Voor het slib dat bij de kleirijperij wordt toegepast geldt een moeilijke ontwatering (o.a. door de hoge lutum- en organische stofgehalte), waardoor het rijpen een grotere uitdaging lijkt te zijn.

5.3 Toepassing in dijken

De toepassing in dijken is in de cases uitgebreid besproken. Daaruit komt een zeer gevarieerd beeld naar voren. Er zijn zowel rapportages van (ongerijpte) klei die direct in op de dijk wordt gebracht, waardoor de dijk zelf een soort van rijpingsveld wordt. Deze benadering lijkt bij beperkte laagdiktes (tot 30 cm) interessant, maar zal bij grotere laagdiktes ongetwijfeld leiden tot krimpscheuren en –bij toepassing van zoute baggerspecie- tot remming van de groei van vegetatie.

De beperking van de toepassing ligt in veel van de projecten in de milieuhygiënische eigenschappen van de baggerspecie. Zo was het moeilijk om de licht verontreinigde Euroklei in projecten “aan de man te brengen”. Dat dit punt zo vaak aan de orde komt, ligt niet aan het feit dat baggerslib altijd vervuild is, maar dat de reden voor veel onderzoek is dat juist voor het vervuilde baggerslib een alternatief moet worden gevonden.

De meningen over het zoutgehalte dat is toegestaan lopen sterk uiteen. In Duitsland is het geen specifieke eis voor zout (al zal er bij een grasdijk wel een functionele eis bestaan met betrekking tot begroeiing), en die is er ook in Nederland lang niet geweest. Nog tot in de jaren 80 werd aangenomen dat alleen voor de deklaag een maximaal zoutgehalte diende te worden voorgeschreven.

5.4 Leerpunten voor de klijrijperij

Uit de cases, de theorie en de eisen waar de klei aan moet voldoen komt naar voren dat de volgende parameters van belang zijn om te volgen tijdens het rijpingsproces:

- Watergehalte
 - Deze parameter blijft de meest bepalende factor wat betreft rijping. Het is zowel direct een doel binnen de kleirijperij als een goede indicator voor de voortschrijding van de rijping. De in de Nederlandse literatuur veelvuldig gebruikte n-factor (die het watergehalte relateert aan de lutum-fractie) is een belangrijke afgeleide waarde daarvoor. De waarde is in de afgelopen jaren vervangen door aan Atterbergse grenzen gerelateerde waardes (met name de consistentie-index). Door de n-waarde ook te rapporteren kan een relatie gelegd worden met de oudere literatuur en een goede eerste indicatie van rijping worden verkregen. Het verschil tussen beide benaderingen is dat bij de Atterbergse-grenzen gebaseerde benadering een directe link wordt gelegd tussen verwerkbaarheid bij een bepaald watergehalte, terwijl deze bij de n-waarde gebaseerd is op de indirecte parameters die de n-waarde beïnvloeden (lutumfractie en percentage organische stof).

- Zoutgehalte
 - Het verwijderen van zout uit de toplaag gaat relatief snel, maar zoutverwijdering levert op verschillende plekken problemen op. Het is daarom van belang het zoutgehalte goed te monitoren als een van de parameters die ertoe *zouden* kunnen leiden dat de klei niet voldoet aan de eisen. Specifieke maatregelen om zout te verwijderen zijn zelden genoemd in de studies, omdat ze parallel lopen aan het verlagen van het watergehalte (draineren, op ruggen zetten). Wel is in de Euroklei-dijktoepassingen voor toepassingen gespoeld met zoet water. Dit zou ook bij de kleirijperij een mitigerende maatregel kunnen zijn. Ook het vooraf verlagen van het zoutgehalte is het overwegen waard.
- Organische stof
 - Meer nog dan de verwijdering van zout, is de verwijdering van het gehalte organische stof maar een beperkt issue in de beschreven cases. Weliswaar is rijping van belang, en daarmee wordt de oxidatie en samenstellingsverandering van het organisch materiaal als relevant gezien. Bovendien volgt uit de rijping van de IJsselmeerpolders het negatieve effect van organisch materiaal omdat het (door het hogere waterbindend vermogen) ervoor zorgt dat scheuren die nodig zijn voor drainage, weer dichtvloeien. Het bewust verlagen van de hoeveelheid om onder een specifieke drempelwaarde te blijven komt beperkt aan de orde en is iets wat binnen de Kleirijperij specifieke aandacht zal moeten krijgen.
- Scheurdiepte en –patronen
 - De literatuurstudie toont dieptes aan van gevormde scheuren (tot 60-80 cm), waardoor scheuren een erg belangrijk afwateringsmogelijkheid zullen zijn. Voorwaarde voor scheuren van dergelijke dieptes is wel dat er voldoende drainage aanwezig is aan de onderkant (door een voldoende lage grondwaterspiegel, en bij voorkeur drainage). Dergelijke scheuren zullen daarmee in kaart gebracht moeten worden om de effecten goed te beschrijven. Bij de beschrijving van dergelijke scheuren is ook het weer van groot belang en de (eventuele) mogelijkheid dat scheuren weer dichtvloeien.

5.5 Kennishiaten

Indien alle relevante informatie over kleirijperijen al beschikbaar was, dan zou een Pilot van deze omvang niet nodig zijn. Hoewel de cases en de theorie een goede indicatie geven van de te verwachte processen, is er echter nog een groot aantal kennishiaten. Deze worden hieronder kort besproken.

5.5.1 Bezinking, consolidatie en rijping

Waar de benadering van bezinking en consolidatie redelijk duidelijk is (met diverse kwantitatieve relaties, waarvan de toepassingsgebieden bekend zijn), is dat veel minder het geval bij rijping. Dit komt doordat – meer dan bij bovengenoemde processen – een driedimensionale benadering benodigd is voor een goede interpretatie, en dat ook diverse gerelateerd processen (waaronder oxidatie van organisch materiaal, weersinvloeden, effecten van de ondergrond) moeten worden meegenomen. Bovendien is ook geotechnisch de beschrijving van onverzadigde (of beter gezegd: gedeeltelijk verzadigde) grond minder goed extrapoleerbaar naar situaties buiten het experiment zelf.

Het lijkt niet realistisch om een alomvattende kwantitatieve beschrijving van deze aspecten binnen een project als de Kleirijperij te verkrijgen, maar een betere voorspelbaarheid van de hoofdaspecten zou wellicht wel tot de mogelijkheden behoren. Het verdient aanbeveling daarom om bij laboratoriumproeven en inrichting van de monitoring de nadruk op de rijping te leggen.

5.5.2 Verwijderen zout

Over de verwijdering van zout is bekend hoe dit plaatsvindt wanneer zoetwater door een verzadigd pakket heen stroomt, net als over de (beperkte) opmenging van zoet en zout water in grond zelf. De uitloogbaarheid bij doorstroming is –mede door milieutechnisch onderzoek van de laatste 30 jaar- ook goed bekend.

Ook hier zit de grootste onbekende in de uitwisseling van zout tijdens de periode dat de klei/het slib onverzadigd is, omdat op die momenten zoetwater-indringing en zout-afvoer vanuit scheuren, osmotische aspecten en effecten van ontwatering niet goed beschreven zijn. Vanuit de cases is vaak juist ontzilting van de toplaag van belang, zodat daar wel voldoende kennis over beschikbaar is, maar wat betreft (de gemiddelde waarde voor) de ontzilting van een rijperij is de kennis beperkt. De homogeniteit van zoutverwijdering en de snelheid zijn daarmee interessante en relevante onderzoeksonderwerpen voor de Kleirijperij.

5.5.3 Scheurvorming

Zowel scheurvorming, als bewerkingsmethodes leiden tot drainage. Hoewel het een en ander bekend is over de ideale afstand van drainage, is over het samenspel tussen deze twee veel onbekend: welke scheuren en scheur-patronen zijn efficiënt en hoe draineren scheuren op gegraven voren? Scheurvorming kan ook een belangrijke indicator zijn voor rijping: zolang scheurvorming blijft optreden is de rijping immers nog niet voltooid.

Wat betreft de toepassing in dijken is er een goed criterium om scheurvorming te beperken (rijpingsfactor $n < 0,75$). Wat de effecten zijn boven deze waarde is niet goed bekend.

5.5.4 Mathematisch Model

Mathematische modellering is van groot belang voor de opschaling van de kleirijperij, en voor de vertaling van de kleirijperij-kennis naar andere toepassingsgebieden. Een vergelijking van beschikbare en geschikte modellen is onderdeel van de scope van het werkpakket Mathematisch Modelleren. Wel kan vanuit deze literatuurstudie worden geconcludeerd, dat geen overall-model bestaat dat consolidatie en rijping goed beschrijft en inzicht geeft in de hoofdparameters waarop kan worden gestuurd (zout, organische stof, watergehalte).

5.5.5 Business cases

De business case voor de kleirijperij staat of valt met duidelijke gegevens over de kosten, en over vraag en aanbod van klei. Dergelijke gegevens zijn slechts spaarzaam aanwezig in de literatuur (mogelijk omdat ze vaak als bedrijfskritisch werden aangemerkt). Toch verdient het aanbeveling om met partijen hierover in contact te treden om de businesscase te toetsen. Los van deze mogelijke extra informatie, zijn de hoofdbestanddelen waaruit de kosten goed bekend, waarmee relatief eenvoudig een raamwerk kan worden opgezet.

5.5.6 Atterbergse grenzen

De wijziging van de Atterbergse grenzen als gevolg van de verwijdering van organisch materiaal, is goed in kaart gebracht, maar over eventuele andere wijzigingen (en de tijdschaal waarop ze optreden) is veel minder bekend, omdat ze veroorzaakt worden door de zeer langzame wijziging van de kleimineralogie. Om hier meer over te kunnen zeggen, zal de wijziging ook in de dijk waar het materiaal wordt toegepast

gedurende langere periodes moeten worden gemonitord. Een alternatief kan zijn, om bij locaties waar materiaal langer geleden is toegepast onderzoek te doen naar de huidige Atterbergse grenzen.

5.5.7 Broeikasgasemissies

We hebben geen informatie kunnen vinden over de broeikasgasemissies van kleirijperij-gerelateerde projecten. De emissie lijkt sterk te worden bepaald door het rijpingsproces (anaeroob of aeroob) en de berekening hangt lijkt sterk af van de gekozen systeemgrenzen: emissies gerelateerd aan organisch materiaal op de kleirijperij zijn direct gekoppeld aan de onttrekking van CO₂ tijdens de vorming ervan (bijv. door algenbloei). De netto-emissie ervan in de kleirijperij hangt er dus sterk vanaf of deze onttrekking wel of niet wordt meegenomen.

5.6 Proces

Bij het maken van deze studie blijkt een behoorlijk aantal case studies vindbaar te zijn, en een groot aantal aan de kleirijperij gerelateerde projecten bij de diverse experts bekend. Daarmee biedt deze rapportage een goed overzicht van de in Nederland (en in Duitsland) uitgevoerde projecten. De diepgang van de gevonden rapportages weerspiegelt echter niet de verwachtingen die de verschillende experts hebben over de beschikbare informatie: vaak wordt toch minder opgeschreven dan er “in de hoofden” van mensen beschikbaar is; of is geen directe toegang meer beschikbaar tot de onderliggende deelrapportages waarin specifieke aspecten worden uitgediept. Een voordeel is wel, dat diverse projecten nog spelen, waardoor door middel van persoonlijke contacten informatie kan worden uitgewisseld om ideeën te toetsen en te leren van elkaars ervaringen. Het gaat dan met name om de ervaringen met Duits slib in Hamburg en Bremen, waarmee via havenautoriteiten contact gelegd kan worden.

6 Literatuurlijst

Nr.	Type	Auteur(s)	Jaar	Titel	Subtitel
1	Article/Paper	Brockamp O., Clauer N.	2012	Clay mineral provinces in tidal mud flats at Germany's North Sea coast with illite KeAr ages potentially modified by biodegradation	Estuarine, Coastal and Shelf Science 107 (2012) 32e45
2	Article/Paper	Brown M.A., Goel A., Abbas Z.	2016	Effect of Electrolyte Concentration on the Stern Layer Thickness at a Charged Interface	Angew. Chem. Int. Ed. 2016, 55, 3790–3794
3	Article/Paper	Gregory J.	1997	The density of particle aggregates	Water Science Technology, vol 36, No4., 1-13
4	Article/Paper	Jommi C., Valimberti N., Tollenaar R.N., Della Vecchia G., van Paassen L.A.	2016	Modelling desiccation cracking in a homogenous soil clay layer: comparison between different hypotheses on constitutive behaviour (webconference)	E3S Web of Conferences 9, 08006 (2016)
5	Article/Paper	Kotylar I. S., Sparks B. D., Schutfe R.	1996	Effect of salt on the flocculation behavior of nano particles in oil sands fine tailings	Clays and Clay Minerals, Vol. 44, No. 1, 121 131
6	Article/Paper	Oliveira B.R.F., van Laarhoven K., Smit M.P.J., Rijnaarts H.H.M., Grotenhuis T.	2017	Impact of compost and manure on the ripening of dredged sediments	Soils Sediments (2017) 17:567–577
7	Article/Paper	Pulat H.F., Yukselen-Aksoy Y.	2014	Influence of Seawater on the Suction and Swelling Behavior of Clayey Soils	Marine Georesources & Geotechnology, 33: 466–472
8	Article/Paper	Robinson R.G., Allam M.M.	1998	Effect of clay mineralogy on coefficient of consolidation	Clays and Clay Minerals, Vol. 46, No. 5, 596-600, 1998.
9	Article/Paper	Schmitz R.M. <i>et al.</i>	2004	Chemo–mechanical interactions in clay: a correlation between clay mineralogy and Atterberg limits	Applied Clay Science 26 (2004) 351– 358
10	Article/Paper	Schmitz R.M., van Paassen L. A.	2003	The decay of the liquid limit of clays with increasing salt concentration	Ingeokring Newsletter, Vol. 9 No. 1 2003, 10-13
11	Article/Paper	van der Meulen J., van Tol F., van Paassen L., Heimovaara T.		Numerical modeling of drying and consolidation of fine sediments and tailings.	
12	Article/Paper	van Tol A.F.	unknown	Consolidatie en rijping van baggerspecie	Havenslib, pag 15-22
13	Article/Paper	Yi Lu, Guanyu Zheng, Wenzhu Wu, Chunhong Cui, Lixiang Zhou	2017	Significances of deflocculated sludge flocs as well as extracellular polymeric substances in influencing the compression dewatering of chemically acidified sludge	Separation and Purification Technology 176 (2017) 243–251

Nr.	Type	Auteur(s)	Jaar	Titel	Subtitel
14	Article/Paper	Zentar R., Abriak N.-E., Dubois V.	2009	Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments	Applied Clay Science 42 (2009) 391–397
15	Article/Paper	Janssens T	unknown	Duurzaam hergebruik van baggerspecie voor creatie van nieuwe dijk	
16	Article/Paper	Giuseppe B <i>et al</i>	2004	Sediment and Dredged Material Treatment - Synthesis of the SedNet Work Package 4 Outcomes	
17	Article/Paper	Derman	unknown	Decontamination and beneficial reuse of dredged material using existing infrastructure for the manufacture of lightweight aggregate	
18	Article/Paper	Laan van der	unknown	Large scale pilot for treatment and use of contaminated dredged material	
19	Article/Paper	Kibbel E.M.	unknown	Dredged Material Management in Rostock	
20	Article/Paper	Dredgdikes	2014	Findings dredgdikes conference	
21	Article/Paper	Balachowski L.	2014	Mechanical properties of bottom ash – dredged material mixtures in laboratory tests	
22	Article/Paper	Cantre S.	2013	Investigation of Dredged Materials in Combination with Geosynthetics Used in Dike Construction	
23	Article/Paper	Cantre S.	2013	Fine-grained organic dredged materials for dike cover layers– material characterisation and experimental results	
24	Other	Bouma J, Jongmans T.	2010	Bodemcanon - Rijping	
25	Other	Ecoshape	unknown	Exploratief veldwerk ecologie griesberg Delfzijl; fotoverslag en de resultaten	
26	Other	Kruse G.A.M.	2013	Toepassen klei met hoger zoutgehalte in dijklichamen	Memo
27	Other	Modder S.T., Keve M., Polderman W.M., van Etten R.J.G., Grootveld H.	unknown	Gerijpte klei vervangt ophoogzand	
28	Other	Moser G.M. <i>et al.</i>	2008	Basisinformatie dijken - Handreiking dijkinspectie	
29	Other	NN	2000	Cultuurtechnisch Vademecum	

Nr.	Type	Auteur(s)	Jaar	Titel	Subtitel
30	Article/Paper	Griffioen, J. Klaver, G., Westerhoff, W.E.	2016	The mineralogy of suspended matter, fresh and Cenozoic sediments in the fluvio-deltaic Rhine–Meuse–Scheldt–Ems area, the Netherlands: An overview and review Netherlands Journal of Geosciences	95(1) pp. 23-107
31	Other	NN	unknown	Bodemrichtlijn - Factsheet: het rijpen van baggerspecie	
32	Other	Rijkswaterstaat	2004	Praktijkboek Bouwen met BAGGERSPECIE dagelijkse praktijk!	
33	Other	van den Dungen M.	2014	Werkessessie - Slib als grondstof	
34	Other	van Loon J.	2013	Presentatie Natuurwaarde van Waterkeringen	
35	Other	Hubbeling H	2015	Plan van aanpak Griesberg	
36	Presentation	Timmers, V. (Hamburg Port Authority - Ingenieurbüro Baggergut)	2012	Presentation Hamburger Baggergut: Verwertung- und beseitigungspfasse	
37	Other	Dredgdikes		dredgdikes flyer	
38	Study/Thesis (report)	Beije K, Stout P., Oldenhof M.	1995	Natuurlijk moet slib ontwaterd worden - studie naar natuurlijke ontwatering van baggerslib in depots in Nederland	
39	Study/Thesis (report)	Boehm C.	2014	Literature review – surrounding salt marshes & wide green dikes	
40	Study/Thesis (report)	Boehm C.	2014	A Wide Green Dike in the Dutch Eems-Dollard A feasibility study	
41	Study/Thesis (report)	Haus W.S.	2011	Beneficial Reuse of Dredged Materials in Upland Environments	
42	Study/Thesis (report)	Hendrickx G.	2016	The influence of the organic matter on the undrained shear strength, compressibility and consolidation of the markermeer sediment	
43	Study/Thesis (report)	Hendriks H.C.M.	2016	The effect of pH and the solids composition on the settling and self-weight consolidation of mud	
44	Study/Thesis (report)	Hoekstra H., Winkels H.J. , Gerritsen J.B.M.	1998	De bodemopbouw van de buitendijkse gronden langs de noordkust van Friesland en Groningen	
45	Study/Thesis (report)	Jarvis P., Jefferson B., Parsons S.A.	2005	Measuring floc structural characteristics	
46	Study/Thesis (report)	Krol, J	2014	WADDENDIJK 2.0 - Projectoverstijgende verkenning Waddenzeedijken Plan van aanpak	

Nr.	Type	Auteur(s)	Jaar	Titel	Subtitel
47	Study/Thesis (report)	Kruse G.A.M.	1985	Kleigrond voor de bekleding van dijken: opmerkingen over het zwellen en krimpen en het ontwikkelen van structuur	
48	Study/Thesis (report)	Lintern D.G.	2003	Influences of flocculation on bed properties for fine-grained cohesive sediment	
49	Study/Thesis (report)	Mietta F.	2010	Evolution of the floc size distribution of cohesive sediments	
50	Study/Thesis (report)	Ministerie van Infrastructuur en Milieu	2015	Economie en Ecologie Eems-Dollard in balans Eindrapport MIRT-onderzoek	
51	Study/Thesis (report)	NN	2006	Verwertung von feinkörnigem Baggergut im Bereich der deutschen Küste	HTG-FA Baggergut
52	Study/Thesis (report)	Oranjewoud	2010	Onderzoeksrapport griesberg Brunner Mond	
53	Study/Thesis (report)	Politiek E., Luijendijk J., Lont C.	2015	Wisselpolders Eems-Dollard - Verkenning naar de haalbaarheid van wisselpolders langs de Groninger Eems-Dollardkust	
54	Study/Thesis (report)	Pons L.J., Zonneveld I.S.	1965	Soil riping and soil classification Initial soil formation in alluvial deposits and a classification of the results	
55	Study/Thesis (report)	Reintsema R.	2013	Towards a green and sustainable Dollard dike. A changing frame of the water board?	
56	Study/Thesis (report)	Rijkswaterstaat	2005	Richtlijn ophogen met klei uit baggerspecie	
57	Study/Thesis (report)	Smit N.	2016	Building with nature: Organic matter and vegetation implication on the Markerwadden	
58	Study/Thesis (report)	Smits H., Zuur A.J., van Schreven D. A, Bosnia W.A.	1962	De fysische, chemische en microbiologische rijping der gronden in de IJsselmeerpolders	
59	Study/Thesis (report)	Steketee J., Langevoort M.	2015	Monsterneming, aferking en laboratoriumonderzoek materiaal Griesberg	
60	Study/Thesis (report)	Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen	1996	Technisch rapport klei voor dijken	
61	Study/Thesis (report)	van Loon J., Schelfhout H.	2013	Gevoeligheidsanalyse Innovatieve Dijken	
62	Study/Thesis (report)	van Loon T. <i>et al.</i>	2015	Haalbaarheidsstudie Multifunctionele Dubbele Keringzone Eemshaven Delfzijl	

Nr.	Type	Auteur(s)	Jaar	Titel	Subtitel
63	Study/Thesis (report)	van Loon-Steensma J.M. <i>et al.</i>	2012	Verkenning innovatieve dijken in het Waddengebied	
64	Study/Thesis (report)	van Loon-Steensma J.M. <i>et al.</i>	2014	Nadere verkenning Groene Dollard Dijk	
65	Study/Thesis (report)	van Overhagen K.	2016	Effect of sand content on the behaviour of Markermeer sediments	
66	Study/Thesis (report)	van Woerden A.A.	2013	Using saltmarshes for the construction of a Green Dollard Dike	
67	Study/Thesis (report)	Yutian YAO	2016	Dewatering Behaviour of Fine Oil Sands Tailings - An Experimental Study	
68	Study/Thesis (report)	Feijen	2014	Slib als grondstof	
69	Study/Thesis (report)	PIANC	2008	Dredged materials as a resource	
70	Study/Thesis (report)	Berg van den	2009	Versneld ophogen met baggerspecie	
71	Study/Thesis (report)	Zuylen van	2011	Haalbaarheidsstudie: Kadverbetering Rijnland	
72	Study/Thesis (report)	STOWA	2005	Gecombineerde verwerking van groenmateriaal en baggerspecie	
73	Study/Thesis (report)	Weinstein M.P.	2002	Beneficial use of dredged material to enhance the restoration trajectories of formerly diked lands	
74	Study/Thesis (report)	Pederson J.	2000	Dredged material management options and environmental considerations.	
75	Study/Thesis (report)	Nejrup L.J.	2014	Legislation and potential for utilization of dredged material in denmark	
76	Study/Thesis (report)	Bovendeur W., Kaatman M.	1996	Droog berekend	
77	Study/Thesis (report)	Laan G.J.	1997	Toepassing klei uit baggerspecie, onderzoek proefophoging Slufter, deelrapport de bepaling van de Atteberggrenzen	
78	Study/Thesis (report)	DHV	1996	mechanische ontwatering van baggerspecie inventarisatie van praktijkgegevens	
79	Study/Thesis (report)	DLO	1997	Intensieve landfarming van verontreinigde baggerspecie: ontwatering en afbraak	
80	Study/Thesis (report)	DGE	2002	Treatment and Confined Disposal	

Nr.	Type	Auteur(s)	Jaar	Titel	Subtitel
81	Study/Thesis (report)	Rijksdienst voor IJsselmeerpolders	1974	De ontziltling en rijping van bekleedingsklei en ontwikkeling van der grasmat van de afsluitdijk van de Lauwerszee,	Flevobericht 93
82	Study/Thesis (report)	Rijksdienst voor IJsselmeerpolders	1983	Ontwatering der Wieringermeergronden	Flevobericht 228
83	Study/Thesis (report)	Rijksdienst voor IJsselmeerpolders	1984	Invloed van kwel op rijping van kleigrond Oostelijk Flevoland	Flevobericht 229
84	Study/Thesis (report)	Rijksdienst voor IJsselmeerpolders	1986	Wording en opbouw van Noordoostpolder, 4 delen Deel 1: Het landbouwkundig onderzoek, ISBN 9036910153	Flevobericht 269
85	Study/Thesis (report)	Rijkswaterstaat directie Flevoland	1989	Land subsidence an soil ripening, ISBN 90-369-1059-5	Flevobericht 306
86	Study/Thesis (report)	A.J. Zuur	1938	Over ontziltling van de bodem in de Wieringermeer	
87	Study/Thesis (report)	Kruse G.A.M.	1990	Literatuurstudie vergelijking ontwateringstechnieken baggerspecie	CO 292651-22
88	Study/Thesis (report)	Gemeentewerken Rotterdam	1987	Toepassing van Euroklei in dijkenbouw - samenvattende rapportage	
89	Study/Thesis (report)	Laboratorium voor grondmechanica	1986	Proefvak Euroklei Streefkerk Deel 2	CO 247312-32
90	Note	Ronald van Etten (Dienst Weg- en Waterbouwkunde)	2004	Ontmanteling 'Sandwichconstructie bij de Slufter'	
91	Study/Thesis (report)	RWS-DWW	2004	Sandwichconstructie bij de Slufter	
92	Presentation	Gerbert, J. (Hamburg Port Authority)	?	Suitability of treated dredged material as construction material for dikes.	results from a long-term field study and from laboratory experiments
93	Article/Paper	Gröngroft, A. Gerbert, J. Eschenbach, A.	2014	Water balance of dikes constructed with dredged material	Results from long-term field test
94	Study/Thesis (report)	K. Rijnierse	1983	Een model voor de simulatie van het fysische rijpingsproces van gronden in de Usselmeerpolders	
95	Study/Thesis (report)	E. Meshkati Shahmirzadi, B. Wichman, J. Hansen, W. van der Star	2018	Vorbereidend laboratoriumonderzoek Kleirijperij	Kleirijperij rapportage wp 4.2.1
96	Study/Thesis (report)	M. van den Heuvel	2017	Kwaliteitsplan Parameters Slib	Kleirijperij rapporage wp 1.2.7
97	Study/Thesis (report)	Figueiredo Oliveira, B.	2017	Lift up of Lowlands : beneficial use of dredged sediments to reverse land subsidence	Proefschrift binnen STW programma Lift up of Lowlands

Nr.	Type	Auteur(s)	Jaar	Titel	Subtitel
98	Study/Thesis (report)	Tollenaar, R.N.	2017	Experimental Investigation on the Desiccation and Fracturing of Clay	Proefschrift binnen STW programma Lift up of Lowlands
99	Study/Thesis (report)	A.G. Brinkman, P Jacobs, R.G. Jak, R. Riegman	2014	Ems-Dollard primary production research, concise summary.	IMARES Report C163/14
100	Article/Paper	P. Dankers, J. Winterwerp	2007	Hindered settling of mud flocs: Theory and validation. Continental shelf research	Continental shelf research, 27(14): 1893-1907.
101	Article/Paper	J.J.B.Bronswijk	1988	Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils	Journal of Hydrology Volume 97(3-4), p199-212
102	Study/Thesis	Ecoshape	2017	Plan van Aanpak Kleirijperij	
103	Study/Thesis	Geodelft	1987	Ontwatering van baggerspecie in een Depot	CO293990/13
104	Study/Thesis	Ingenieursbureau Havenwerken van Gemeentewerken Rotterdam	1995	Klei uit Baggerspecie inventarisatie oude rijpingskennis	W-DWW-95-346
105	Study/Thesis	Grondmechanica Delft	1986	Onderzoek van kleibekleding van dijken langs IJssel en Pannerdens Kanaal voor het ontwikkelen van keuringseisen voor kei	CO- 275921/47
106	Article/Paper		1948	Classification and identification of soils:	Transactions, ASCE, 113, 901-930.
107	Article/Paper	S. Azam, M. Ito & F. Khan	2013	Influence of cracks on soil water characteristic curve	Advances in Unsaturated Soils, Caicedo et al. (eds), p217-220
108	Study/Thesis	Swedish Geotechnical Institute	2004	Quick clay in Sweden	Report 65
109	Study/Thesis	Mitchel, J.K.	1993	Fundamentals of Soil Behavior	2nd edition, John Wiley & Sons
110	Book	Healy, R.W., Scanlon, B.R.	2010	Estimating Groundwater Recharge	Cambridge University Press
111	Book	Terzaghi, Karl	1925	Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage	Franz Deuticke, Leipzig - Vienna
112	Book	Terzaghi, Karl , Peck, Ralph B.	1948, 1967	Soil Mechanics in Engineering Practice (Second Edition)	John Wiley & Sons Inc, New York
113	Book	Keverling Buisman, A.S.	1940 1996	Grondmechanica (heruitgave)	Balkema, Rotterdam
114	Article/Paper	Malusis, M.A. Shackelford, M.B. Olsen, H.W.	2003	Flow and transport through clay membrane barriers	Engineering Geology 70 p235 – 248
115	Article/Paper	Vermeulen, J.; Grotenhuis, J.T.C.; Joziassse, J.; Rulkens, W.H.	2003	Ripening of clayey dredged sediments during temporary upland disposal, A Bioremediation technique.	Journal of Soils and Sediments 3 p1

Nr.	Type	Auteur(s)	Jaar	Titel	Subtitel
116	Article/Paper	DeCarlo, K.F., Shokri, N.	2014	Salinity effects on cracking morphology and dynamics in 3-D desiccating clays	Water Resources Research., 50 p3052–3072
117	Article/Paper	Peron, H., Laloui, L, Liang-Bo, H, Hueckel, b.	2012	Formation of drying crack patterns in soils: a deterministic approach	Acta Geotechnica, 8(2) p 215–221
118	Article/Paper	Saathoff, F., Cantre, S.	2014	The Project Dredgdykes	
119	Study/Thesis	Landesarbeitsgemeinschaft Abfall	2004	Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung 1.2 Bodenmaterial (TR Boden)	
120	Article/Paper	Merckelbach, L.M., Kranenburg, C.	2004	Determining effective stress and permeability equations for soft mud from simple laboratory experiments	Geotechnique 54 (9), p 581 – 591
121	Article/Paper	Gibson, R.E., England, G.L., Hussey, M.J.L.	1967	The Theory of one-dimensional consolidation of saturated clays	Geotechnique 17 p261 – 273.

Overzicht figuren en tabellen

Tabellen

Tabel 1 Parameters van het uitgangsmateriaal in de haven van Delfzijl (boven) en de polder Breebaart (onder):	4
Tabel 2: Aanduiding van het rijpingsstadium op basis van de n-factor.	9
Tabel 3: Bepaalde n-factoren tijdens rijping bij afsluiting Lauwerszee. Bron: [81]	25
Tabel 4: : Bepaalde n-factor (waterfactor). Bron: [83]	28
Tabel 5: Aanwezigheid van zwavel. Bron: [84]	30
Tabel 6: Bodemkundige samenstelling baggerspecie van Euroklei en de bronlocatie (Oostelijk havengebied van Rotterdam). Bron:[88]	31
Tabel 7: Wrijvingseigenschappen Euroklei. Bron: [88], pagina 19	35
Tabel 8: Parameters materialen testdijk Gdansk (DredgDikes-project)	38
Tabel 9: Gemeten materiaal- en sterkte-eigenschappen baggerspecie. Gemeten is voor en na aanleg en in de laatste kolom is een vergelijking gemaakt met een proef uit 1995. (bron: [91])	42
Tabel 10: Eigenschappen testdijken langs de Elbe Bron: [36]. (Er zijn geen metingen beschikbaar over emissies van andere zware metalen en andere parameters uit het METHA-slibdek	45
Tabel 11: Vergelijking van verschillende cases	53

Figuren

Figuur 1: Locatie van de kleirijperij en de slibbronnen.	2
Figuur 2: Relatie tussen de verschillende onderdelen van de Pilot Kleirijperij	3
Figuur 3: Scheurvorming in klei in het laboratorium als functie van de laagdikte [101].	10
Figuur 4: Erosiebestendigheid van klei als functie van de vloeigrens en plasticiteitsindex	12
Figuur 5: Samenstelling van verschillende kleimineralen en indeling naar kristalconfiguratie en kation tussen de kleiplaatjes. Uit: [109]	15
Figuur 6: Luchtfoto Proefpolder Andijk 1926	18
Figuur 7: <i>Foto van aanleg Afsluitdijk Lauwerszee 1969</i>	24
Figuur 8: Berekening van de n-factor (waterfactor). Bron: [83]	27
Figuur 9: Ontwikkeling grondwaterstand. Bron: [84]	29
Figuur 10: Euroklei op ruggen gezet (links) en geproduceerde Euroklei (rechts, 1987) - Rijkswaterstaat / Jan Muijs / Ronald van Etten),	31
Figuur 11: Bepaling n-factor (rijpingsfactor). Bron: [88], pagina 4	32
Figuur 12: Scheurvorming bij buitendijkse dijkverzwaring (linkeroever Lekdijk in de Alblasserwaard) met Euroklei in 1988(Rijkswaterstaat / Dico van Ooijen),	34
Figuur 13: Overzicht van deelnemers aan het DredgDijk-project. Bron: www.dredgdike.eu	36

Figuur 14: Testdijk Rostock (DredgDike)	37
Figuur 15: Foto testdijk Rostok (DredgDike)	37
Figuur 16: Opbouw testdijk Gdansk (DredgDikes-project)	38
Figuur 17: Foto testdijk Gdansk (DredgDike)	38
Figuur 18: Luchtfoto Slufter (Haven Rotterdam)	40
Figuur 19: Opbouw sandwich-constructie met zand en klei gemaakt uit Baggerspecie (bron: [90])	41
Figuur 20: Ligging METHA Anlage Hamburg, overpompen van baggerspecie naar de verwerkingsite (bron: Filmförderung Hamburg Schleswig-Holstein) en membraankamerfilterpers in de METHA Anlage (bron: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe)	43
Figuur 21: Spoelveld Moorburg-Mitte in het havengebied van Hamburg	44
Figuur 22: Locatie Testdijk (bron: [36])	
Figuur 23: Testdijk met METHA-slib	45
Figuur 24: Locatie Testdijk (bron: [36])	46
Figuur 25: Ligging rijpvelden Rostock	47
Figuur 26: Ligging Ontwateringsvelden Bremerhaven en foto van ontwateringsvelden (born: www.Bremenports.de)	48
Figuur 27: Doorsnede dijk bij Bremen [1]	49
Figuur 28: Luchtfoto van opgeleverde compartimenteringsdijk Vlassenbroek (najaar 2013)	51
Figuur 29: Principe-profiel toepassen baggerspecie dijkverbreding Gamerwolde	51
Figuur 30: Geografische ligging slikken Waddenzee en foto van slik in de Waddenzee (bron: Waddenzeeschool.nl)	52