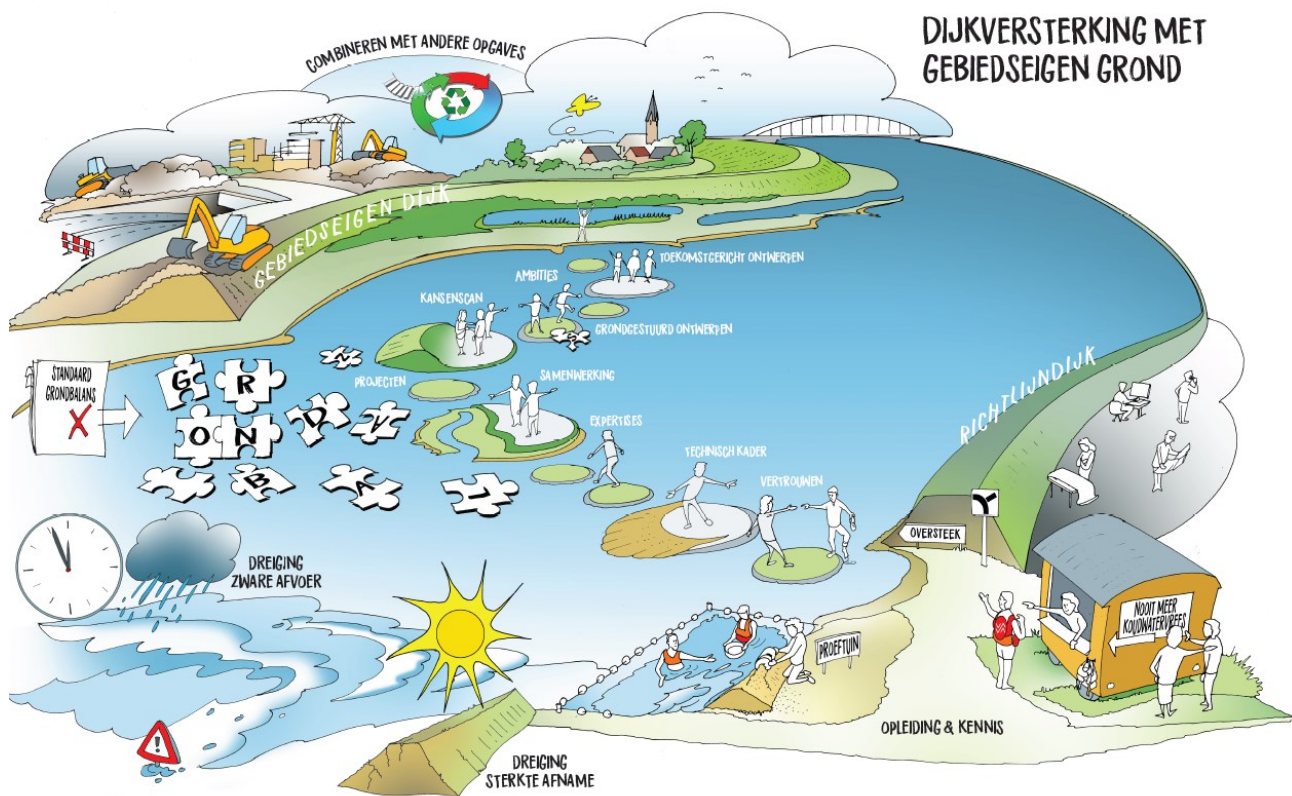


TECHNISCH KADER

TOEPASSING GEBIEDSEIGEN GROND

VAN RICHTLIJNGESTUURD NAAR GRONDGESTUURD ONTWERPEN





pov dijkversterking
met gebiedseigen grond

Colofon

Definitief
Versie 1.0
4 oktober 2022

| IPM team en schrijfteam POV-DGG | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Albert Gerrits | IPM-team |
| Albert Wiggers | Schrijfteam POV-DGG |
| Arjan Kooij | IPM-team en schrijfteam POV-DGG |
| Jasper van de Hoef | IPM-team |
| Joep Schreurs | IPM-team |
| Marieke Bos | eindredactie POV DGG |
| Martin van der Meer | IPM-team en schrijfteam POV-DGG |
| Mirjam Molen | IPM-team en schrijfteam POV-DGG |
| Pascale van Dolder | IPM-team |
| Werner Halter | Schrijfteam POV-DGG |
| Wilfried Jansen of Lorkeers | Illustraties POV-DGG |

Dit document is twee keer gereviewd en besproken in de klankbörgroep, een overzicht van de reviewers is opgenomen in bijlage 4.

Inhoudsopgave

| | | |
|------------------|--|-----------|
| Voorwoord | | 1 |
| 1 | <i>Inleiding</i> | 2 |
| 1.1 | Doel grondgestuurd ontwerpen | 2 |
| 1.2 | Doelgroep en afbakening | 2 |
| 1.3 | Stroomschema voor toepassing grondgestuurd ontwerp | 3 |
| 1.4 | Leeswijzer | 5 |
| 2 | <i>Het matchen van grondvraag en -aanbod</i> | 6 |
| 2.1 | Inleiding | 6 |
| 2.2 | Wat is grondgestuurd ontwerpen? | 6 |
| 2.3 | Ontwerptrechter biedt groeiend inzicht | 8 |
| 2.4 | Kansen tijdens de voorverkenning | 9 |
| 2.4.1 | Dijkversterking met gebiedspartners | 9 |
| 2.4.2 | Vroege start | 9 |
| 2.4.3 | Kansenscan en Kansenskaart | 10 |
| 2.4.4 | Aandachtspunten bij vroegtijdig koppelen vraag en aanbod | 11 |
| 2.5 | Kansen tijdens het ontwerpproces | 11 |
| 2.6 | Kansen tijdens realisatie | 12 |
| 2.7 | Informatiebehoefte DGG | 13 |
| 2.7.1 | Handelingsperspectief risicogestuurd onderzoek | 13 |
| 2.7.2 | Onderzoek bestaande dijk | 14 |
| 2.8 | Vertalen van grondaanbod naar toepassingsmogelijkheid in het ontwerp | 15 |
| 3 | <i>Classificeren van grond in Nederlandse dijken</i> | 19 |
| 3.1 | Inleiding | 19 |
| 3.2 | Oude methode voor classificatie van grond: NEN 5104 | 19 |
| 3.3 | De geldende methode voor classificatie van grond: NEN-EN-ISO 14688 | 21 |
| 3.4 | Beschrijving van dijksmateriaal | 26 |
| 3.5 | Bepalen van eigenschappen dijksmateriaal | 28 |
| 3.5.1 | Bureaustudie op basis van gebiedskennis | 29 |
| 3.5.2 | Visuele beoordeling grondmonsters | 30 |
| 3.5.3 | Classificatieproeven | 33 |
| 3.5.4 | Standaardproeven voor dijksmateriaal | 34 |
| 3.5.5 | Maatwerkonderzoek/speciale proeven | 35 |
| 4 | <i>Nuanceren van de standardeisen voor dijksmateriaal</i> | 40 |
| 4.1 | Inleiding | 40 |
| 4.2 | Mogelijkheden voor onderbouwd afwijken | 40 |
| 4.3 | Traditioneel versus functioneel ontwerpen | 40 |
| 4.4 | Relevante grondeigenschappen per functie | 41 |
| 4.4.1 | Structuur in eigenschappen en eisen | 41 |
| 4.4.2 | Duiding van standardeisen voor dijksmateriaal | 42 |



| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.4.3 | Werkwijzen bij nuanceren standaardeisen | 44 |
| 4.4.4 | Mogelijke redenen afwijkingen bij dijksmateriaal | 46 |
| 4.5 | Beïnvloeding van grondeigenschappen door veroudering | 48 |
| 4.5.1 | Compactie | 50 |
| 4.5.2 | Verandering watergehalte | 50 |
| 4.5.3 | Verandering zuigspanningen | 51 |
| 4.5.4 | Cementatie | 51 |
| 4.5.5 | Biologische activiteit | 52 |
| 4.5.6 | Peptisatie en flocculatie | 52 |
| 4.5.7 | Oxidatie | 53 |
| 4.5.8 | Vorst-dooiwisseling | 53 |
| 4.5.9 | Rijping | 53 |
| 4.5.10 | Structuurvorming | 54 |
| 4.5.11 | Verweking | 55 |
| 4.5.12 | Erosie | 56 |
| 4.5.13 | Samenvatting verouderingsprocessen | 56 |
| 5 | <i>Het toepassen van gebiedseigen grond in ontwerp, uitvoering en beheer</i> | 60 |
| 5.1 | Inleiding | 60 |
| 5.2 | Aantoonbaarheid | 60 |
| 5.2.1 | Proces naar een gevalideerd ontwerp | 60 |
| 5.2.2 | Onderzoeksplan en verificatieplan opstellen | 61 |
| 5.2.3 | Aantoonbaarheid bulkgedrag en op grote schaal testen | 61 |
| 5.2.4 | Aantoonbaarheid langetermijngedrag | 62 |
| 5.2.5 | Acceptatie vanuit beheer en onderhoud | 62 |
| 5.3 | Ruimte zoeken in het ontwerp | 62 |
| 5.3.1 | Verschillende ontwerpkeuzen | 63 |
| 5.3.2 | Dijkgeometrie aanpassen | 63 |
| 5.3.3 | Materiaalkeuze aanpassen | 64 |
| 5.3.4 | Ontwerp gebiedsontwikkeling aanpassen | 67 |
| 5.4 | Opwaarderen grond door wijze van groundbewerking | 67 |
| 5.4.1 | Beïnvloeden constructieve eigenschappen door wijze van uitvoering | 67 |
| 5.4.2 | Rijping in bodem | 69 |
| 5.4.3 | Winning | 69 |
| 5.4.4 | Verwerken in depot | 70 |
| 5.4.5 | Rijping in depot | 71 |
| 5.4.6 | Verwerken in ophoging en verdichting | 72 |
| 5.4.7 | Afwerken en inzaaien | 73 |
| 5.5 | Aanpassen van het beheer en onderhoud na realisatie | 74 |
| 5.5.1 | Uitgangstoets en opleverdossier | 74 |
| 5.5.2 | Monitoren en beheer | 74 |
| 5.5.3 | Extra kleireserves binnen beheerzone | 74 |
| 6 | <i>Slotopmerkingen</i> | 75 |
| 6.1 | Inzichten uit de voorbeelden | 75 |
| 6.2 | Aandachtspunten en kansen voor de implementatiefase | 76 |
| | <i>Literatuurlijst</i> | 78 |

| | | |
|-----------------|---|------------|
| Bijlagen | | 82 |
| 1 | <i>Begrippenlijst</i> | 83 |
| 2 | <i>Factsheets kleiparameters en eisen</i> | 85 |
| 2.1 | Plasticiteitsindex | 86 |
| 2.2 | Vloeigrens | 87 |
| 2.3 | Zandgehalte | 88 |
| 2.4 | Organisch stofgehalte | 89 |
| 2.5 | Kalkgehalte (gewichtsverlies bij HCl-behandeling) | 93 |
| 2.6 | Zoutgehalte | 94 |
| 2.7 | Lutumgehalte | 95 |
| 2.8 | Verkleuringen, afwijkende geuren en andere inhomogeniteiten | 98 |
| 3 | <i>Verificatiemethode grondgestuurd ontwerpen steilranddijk Ooijen-Wanssum</i> | 99 |
| 4 | <i>Reviews</i> | 106 |

Voorwoord

Voor u ligt het Technisch kader toepassing gebiedseigen grond. Een korte historie over het gebruik van gebiedseigen grond is hier op zijn plek. Het is namelijk niet iets nieuws. De eerste dijkwerkers gingen bij het bouwen van een dijk noodgedwongen uit van het materiaal dat voorhanden was in de omgeving. In sommige gebieden was goede klei aanwezig. Maar als dat niet het geval was, dan moesten de vroege dijkbouwers creatief zijn met andere materialen. Langs het IJsselmeer zijn bijvoorbeeld dijken bekend die uit zeegras zijn opgebouwd.

Met de komst van nieuwe machines voor grondverzet werd het mogelijk om de dijkbouw en het benodigde materiaal te standaardiseren. Zo wordt de kwaliteit van dijken geborgd. Het materiaal dat aan de eisen voldoet, is vaak niet in de nabijheid van een project beschikbaar, het moet van verder weg worden gehaald. Deze aan- en afvoer van grond veroorzaakt een groot aantal transportbewegingen, die vaak een forse impact op de omgeving hebben. Het zorgt voor overlast bij bewoners, bij dieren en ook voor belasting van het milieu.

Hoe kan het anders? De insteek van dit Technisch kader is om het gebruik van grond uit de directe nabijheid van een dijkversterking te stimuleren. Op die manier daalt het aantal transportbewegingen en dat helpt om de lokale hinder te beperken. Ook (inter)nationaal scheelt het in de uitstoot van broeikasgassen. Of we met het Technisch kader ook weer dijken gaan bouwen van zeegras is de vraag. Maar er zijn zeker voldoende mogelijkheden om met lokale grond een robuuste dijk te bouwen.

Wij danken iedereen die heeft bijgedragen aan het opstellen van dit Technisch kader voor het delen van kennis en het reviewen van de teksten. Het toepassen van gebiedseigen grond in dijkversterkingen is een mooie kans. Wij wensen alle technisch managers, ontwerpers en andere geïnteresseerden veel succes en plezier hiermee.

1 Inleiding

Deze uitgave is een initiatief van de projectoverstijgende verkenning Dijkversterking met Gebiedseigen Grond (POV-DGG) van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). De POV-DGG stimuleert en faciliteert het gebruik van gebiedseigen grond bij dijkversterkingen.

Vroeger was bouwen met lokaal beschikbare grond normaal. Maar om de kwaliteit van dijken te borgen en ook grond uit het buitenland te kunnen toepassen, zijn uniforme regels opgesteld. Lokale grond voldoet vaak niet aan deze uniforme regels. Het vraagt vakmanschap en grondkennis om toch een veilige dijk te realiseren met lokaal beschikbare grond.

Hoe je dit aanpakt, dat staat beschreven in dit Technisch kader. Het gebruik van lokale grond is (nog) geen standaardpraktijk. De huidige ontwerppraktijk gaat uit van vooraf vastgestelde technische kaders of richtlijnen, oftewel 'richtlijngestuurd ontwerpen': het ontwerp bepaalt de eisen waar de grond aan moet voldoen. Waar we naartoe willen, is 'grondgestuurd ontwerpen': de kwaliteit van de beschikbare grond is leidend voor het ontwerp.

Het vergt ambitie om deze omslag te maken. Een ambitie die overigens goed waar te maken is. Want uit een inventarisatie van dijkversterkingsprojecten blijkt dat binnen de huidige regels technisch al veel meer mogelijk is dan de strenge regels suggereren. Belangrijke randvoorwaarden zijn voldoende tijd en ruimte voor het ontwerpen van een grondgestuurd alternatief. Ook vraagt het vaak om vroegtijdige afstemming van grondstromen om de winlocatie aan de dijkversterking te koppelen.

Deze en nog veel meer randvoorwaarden en adviezen staan allemaal beschreven in dit Technisch kader.

Voor dit Technisch kader is gebruikgemaakt van verschillende bronnen. We geven deze bronnen aan met een getal tussen vierkante haakjes, bijvoorbeeld [1]. Deze bronnen zijn terug te vinden in de literatuurlijst.

Naast het Technische kader heeft de POV-DGG nog een aantal andere producten opgeleverd:

- Kansenscan. Een instrument om overzicht te krijgen van komende projecten met een potentiële grondvraag en/of -aanbod. Op basis van deze scan kan een project, bij voorkeur voor de start, verkennen waar de mogelijkheden, globale kansen en risico's van het toepassen van gebiedseigen grond liggen.
- Storylines. Praktijkvoorbeelden van projecten die elementen uit dit Technisch kader hebben gebruikt: Ooijen-Wanssum, Brede Groene Dijk, Dubbele Dijk en Grebbedijk. Deze staan ook beschreven in dit document.
- Cursus ontwerpen van het HWBP. De POV-DGG draagt bij aan deze cursus met kennis over grondgestuurd ontwerpen.

1.1 Doel grondgestuurd ontwerpen

Het doel van grondgestuurd ontwerpen is om in alle projectfasen te kijken naar de mogelijkheden en kansen voor het toepassen van gebiedseigen grond. Deze ontwerpmethodiek draagt bij aan de duurzaamheidsdoelstelling van het HWBP. Het gebruik van gebiedseigen grond betekent namelijk milieuwinst door minder transportbewegingen. Dit zorgt mogelijk ook voor minder overlast in het gebied.

1.2 Doelgroep en afbakening

Dit Technisch kader is met name geschreven voor de technisch manager en voor ontwerpers. Ook nodigen we de overige leden van het IPM-team uit om het document te lezen. Het Technisch kader geeft inzicht in wat nodig is om gebiedseigen grond toe te passen en wat de voordelen zijn.

In dit Technisch kader wordt met name gekeken naar de technische eigenschappen van klei en hoe deze functioneel ingezet kunnen worden in het ontwerp. Andere aspecten zoals milieu-hygiënische kwaliteit,

vergunningen, omgevingsproces, landschappelijke inpassing en afstemmen met HWBP en beheerder, worden niet behandeld. Ook maakt een brede analyse over de succesfactoren en kansen voor toepassen van gebiedseigen grond, anders dan de techniek, geen onderdeel uit van dit Technisch kader. Hiervoor verwijzen wij naar “Analyse succesfactoren en gebiedspotentieel dijkversterking met gebiedseigen grond” [1].

Het rapport is geschreven vanuit een HWBP-visie, dus voor primaire waterkeringen. De aanpak van grondgestuurd ontwerpen is echter ook toepasbaar voor regionale waterkeringen.

1.3 Stroomschema voor toepassing grondgestuurd ontwerp

De keuze voor een grondgestuurde dijkontwerp kan ingewikkeld zijn. Tijdens het opstellen van dit Technisch kader ontdekten we verschillende manieren om af te wijken van de standaard-eisen. Bijvoorbeeld door aan te tonen dat het ontwerp ook voldoet als niet aan alle standaard-eisen wordt voldaan. Deze eerste mogelijkheid noemen we:

1. Nuanceren van de standaard materiaaleisen door terug te gaan naar functionele eisen.

Wat ook kan, is het ontwerp aanpassen zodat de gebiedseigen grond aan alle eisen voldoet. De mogelijkheden hiervoor zijn:

2. Ruimte zoeken in het ontwerp.
3. Opwaarderen van grond tijdens de uitvoering.
4. Aanpassen van het beheer en onderhoud na realisatie.

De verschillende mogelijkheden zijn in onderstaand stroomschema verder uitgewerkt. Het stroomschema vormt ook het uitgangspunt voor de indeling van dit Technisch kader.



Figuur 1 Stroomschema toepassen gebiedseigen grond in dijkversterking voor gebruik van het Technisch kader

1.4 Leeswijzer

Dit Technisch kader is als volgt opgebouwd. We geven eerst een introductie van grondgestuurd ontwerpen en laten zien op welke momenten en met welke hulpmiddelen het kan worden toegepast (hoofdstuk 2). Daarna komt de grond zelf aan bod (hoofdstuk 3). We lichten onder andere toe hoe van een partij grond kan worden bepaald of deze geschikt is voor toepassing in dijken. Vervolgens komen de manieren om onderbouwd af te wijken van de eisen aan bod. Als eerste leest u hoe klei functioneel kan worden ingepast in dijkversterkingsontwerpen (hoofdstuk 4). Ook lichten we hier de verschillende vormen van veroudering toe. Daarna leest u over de andere mogelijkheden om onderbouwd af te wijken van de eisen, namelijk ruimte zoeken in het ontwerp; het opwaarderen van grond; en een ander beheer en onderhoud (hoofdstuk 5). Ook geven we hier voorbeelden van het verantwoord gebruik van gebiedseigen grond met afwijkende eigenschappen. We sluiten af met enkele slotopmerkingen en het vervolg. Dit Technisch kader is namelijk geen eindstation. Het plan is om dit document regelmatig te updaten met uw ervaringen.

2 Het matchen van grondvraag en -aanbod

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat over het vinden van een match tussen de grondvraag en het beschikbare grondaanbod in het gebied. Aan de hand van voorbeelden en de ontwerptrechter van het dijkversterkingsproces maken we duidelijk op welke momenten en met welke hulpmiddelen het zogenaamde grondgestuurd ontwerpen kan worden toegepast. Ook lichten we het belang van structuur in eisen toe.

2.2 Wat is grondgestuurd ontwerpen?

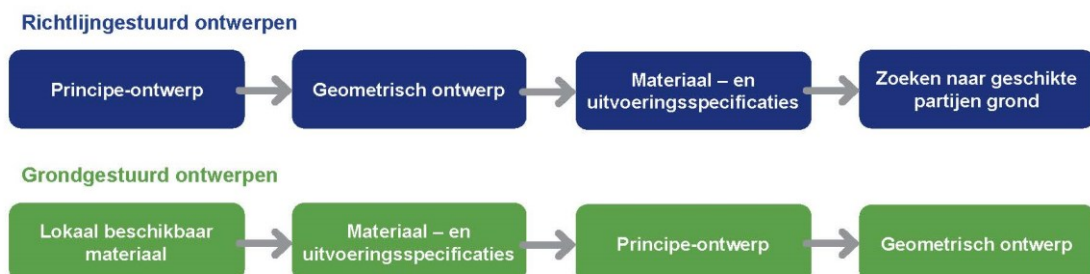
Sinds de jaren tachtig staan in de Nederlandse ontwerp-aanpak richtlijnen centraal. Pas in een laat stadium wordt gezocht naar geschikt bouw materiaal op basis van materiaalspecificaties die volgen uit het ontwerp. We beschreven dit eerder al als 'richtlijngestuurd ontwerpen'.

Bij 'grondgestuurd ontwerpen' daarentegen wordt gestart met het inventariseren van lokaal beschikbaar materiaal en de eigenschappen daarvan. Op basis van de beschikbare grond wordt een ontwerp gemaakt. Grondgestuurd ontwerpen was vroeger in Nederland gebruikelijk, toen er nog geen technische richtlijnen waren. Archeologisch onderzoek geeft inzicht in die oude traditie en laat zien dat er grote verschillen kunnen ontstaan, afhankelijk van het materiaal dat voorhanden was. Illustratief zijn de relatief homogene dijkopbouw van de Wissendijke en de heterogene opbouw van de Westfriese Omringdijk.



Foto 1 links de Wissendijke, dijkblootlegging 2015 (bron: [Engelse, 2016]). Rechts archeologische opgraving van de Westfriese Omringdijk bij Schardam (bron: [Archeologie West-Friesland, 2016])

Figuur 2 geeft schematisch het verschil weer tussen richtlijngestuurd en grondgestuurd ontwerpen.



Figuur 2 Richtlijngestuurd ontwerpen versus grondgestuurd ontwerpen om inzicht te krijgen in de verschillen

Bij grondgestuurd ontwerpen is het lokaal aanwezige materiaal dus leidend in het ontwerp. Dit is een traditie van ontwerpen die in de meeste Europese landen en daarbuiten vrij gebruikelijk is. In een inventariserend onderzoek naar buitenlandse praktijken over het omgaan met gebiedseigen grond [2] is hier verslag van gedaan. In Tabel 1 is het richtlijngestuurde ontwerpen afgezet tegen grondgestuurd ontwerpen. Het doel is om de kenmerkende verschillen tussen beide aanpakken te benadrukken.

Tabel 1 Kenmerkende verschillen in richtlijngestuurd en grondgestuurd ontwerpen

| Richtlijngestuurd ontwerpen | Grondgestuurd ontwerpen |
|--|---|
| Lokaal beschikbaar materiaal is niet sturend | Lokale materialen zijn bepalend voor het principe-ontwerp |
| Het principe-ontwerp volgt uit ontwerp binnen kaders van richtlijnen en uit wensen en eisen van beheerder | Principe-ontwerp gaat uit van samenspel van materialiseren en geometrisch ontwerp. Uitwisselbaarheid moet mogelijk zijn |
| Onderzoek naar beschikbaarheid materiaal bij uitvoerende partij aan einde van het ontwerptraject. Bij uiteindelijke partijkeuze speelt locatie winplaats vaak geen (dominante) rol | Vooronderzoek beschikbaar materiaal aan begin van ontwerptraject, voorafgaand aan de ingangstoets |
| Het bepalen van grondsoorten voor dijkopbouw is onderdeel van ontwerpproces. Keuzes worden vaak pas aan het eind gemaakt. De materiaaleisen per grondsoort zijn vaak gestandaardiseerd | Vroegtijdig inzicht in materiaaleigenschappen en in uitvoeringsaspecten, zoals tijd en benodigde ruimte voor de bouw |
| Comply or explain: afwijkingen mogelijk met onderbouwing | Lerend ontwerpen binnen grenzen van veiligheid: materiaalkennis, uitvoeringskennis en kennis langetermijngedrag en beheer. Monitoren tijdens hele levenscyclus (ontwerp – uitvoering – beheer) |
| Ontwerpteam hangt af van ontwerpfasen. Aan begin nadruk op kennis richtlijnen en aan eind nadruk op uitvoeringskennis en vakmanschap. | Ontwerpteam in optima forma: ontwerper, uitvoerder en beheerder vormen samen ontwerpteam (bouwteam of alliantievorm). In veel ontwerpculturen is deze samenwerkingsvorm erg ongebruikelijk of zelfs onmogelijk. In dat geval dient ontwerper over ruime kennis van dijkontwerp, uitvoering en onderhoud te beschikken |
| Veel technisch inhoudelijke verantwoordelijkheid bij overheden en instituten die technische leidraden vaststellen | Veel verantwoordelijkheid bij ontwerper(s) |
| Landelijke ervaring met gedrag van gespecificeerde materialen op langere termijn. Op deze wijze is deel van terugkoppelingen vanuit beheer naar ontwerp gewaarborgd. Echter: aandachtspunt blijft zaken die verband houden met klimaatverandering en andere ontwerpbelastingen | Beheer: vereist ook een leercyclus met terugkoppelingen van de beheerders naar de ontwerpers |

Voorgaand overzicht zet de meest vergaande vorm van grondgestuurd ontwerpen neer. In de Nederlandse praktijk wordt al wel regelmatig grondgestuurd ontworpen. Een inventariserend onderzoek naar de Nederlandse praktijk van het gebruik van gebiedseigen grond [3] doet daar verslag van. Maar het gaat dan vaak om discussies over grond met geringe afwijkingen ten opzichte van de standaard materiaalspecificaties, bijvoorbeeld over eisen voor een kleibekleding [3]. Een verdergaande vorm van grondgestuurd ontwerpen, waarbij gebruik van gebiedseigen grond centraal staat in het ontwerpproces, biedt ook in Nederland meer kansen voor duurzaam ontwerpen. Dit is mogelijk zonder afbreuk te doen aan de veiligheid.

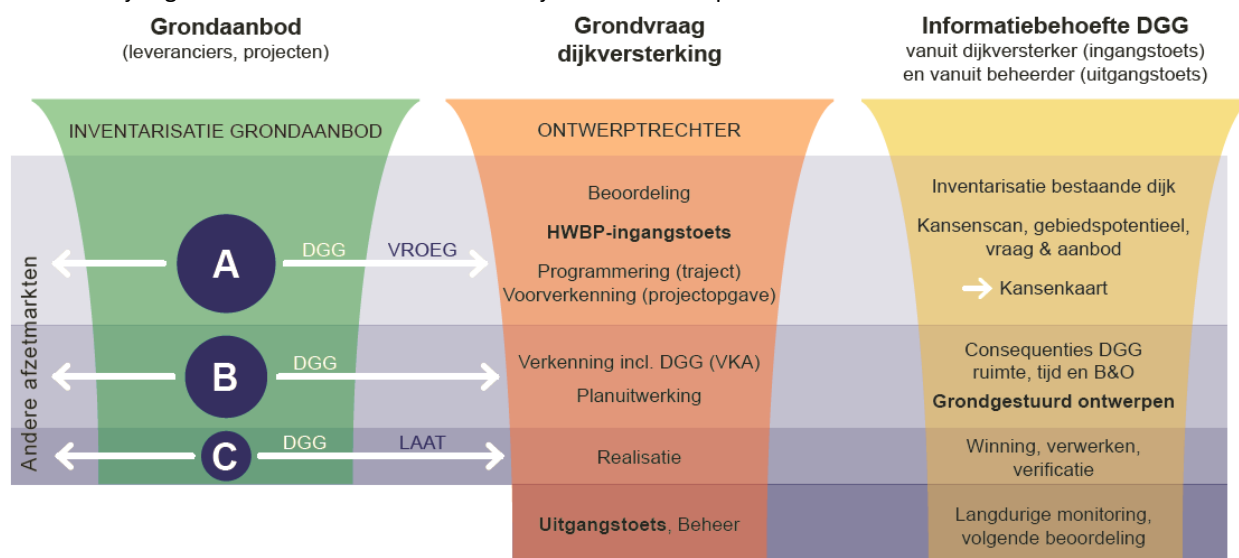
De volgende paragraaf behandelt de consequenties voor het ontwerpproces. In hoofdstuk 5 leest u meer over de keuzes voor de ontwerper.

2.3 Ontwerptrechter biedt groeiend inzicht

De technisch manager moet in alle ontwerpstappen van het project keuzes maken om te onderzoeken welk grondaanbod beschikbaar is en welke informatie nodig is. Hiermee kan de technisch manager deze keuzes voorleggen aan de bestuurder en ontwerpvragestukken neerleggen bij de specialist. Om de diverse stappen en keuzes inzichtelijk te maken, is een ontwerptrechter opgezet.

Om kansen voor het gebruik van gebiedseigen grond optimaal te benutten, is het cruciaal dat **vroegtijdig en in alle fasen** van de ontwerptrechter aandacht wordt besteed aan de potentie van lokaal toe te passen gronden. Figuur 3. laat de ontwerptrechter zien, in relatie tot het grondaanbod, de grondvraag en de informatiebehoefte.

- Grondvraag. De middelste, rood gearceerde kolom presenteert de bekende ontwerptrechter voor de hele levenscyclus van een dijkversterking, vanaf het moment van beoordelen tot aan beheer. De trechter geeft aan dat de bandbreedte in grondvraag smaller wordt naarmate het ontwerp vordert.
- Grondaanbod. De linker, groen gearceerde kolom toont het potentiële grondaanbod voor dijkversterking van grondaanbieders in de regio. Grondaanbieders kunnen op verschillende momenten van het ontwerpproces instappen. Inventarisatie van het grondaanbod heeft een ander tijdschema dan de ontwerptrechter.
- Informatiebehoefte DGG. De rechter, geel gearceerde kolom laat zien welke informatie de dijkwerker en beheerder nodig hebben bij een dijkversterking met gebiedseigen grond (DGG). De kunst van het grondgestuurd ontwerpen is om informatie in grondaanbod en grondvraag tijdens het gehele proces te volgen en te sturen. Door al vroegtijdig te beschikken over de juiste informatie, kunnen grondaanbiedende en grondvragende partijen bij elkaar worden gebracht en ontstaat een match. In paragraaf 2.7 leest u een nadere beschrijving van de informatiebehoefte en vrijheid van keuze per fase.



Figuur 3 Optimaal gebruik van gebiedseigen grond in een dijkversterking vraagt om een bredere verkenning en meer informatie tijdens de ontwerptrechter. De breedte van de trechter geeft de bandbreedte weer voor mogelijkheden om lokaal vrijkomende grond in de dijkversterking toe te passen.

Figuur 3 laat zien dat optimaal gebruik van gebiedseigen grond in een dijkversterking om een bredere verkenning vraagt. Grondvragende en grondaanbiedende partijen moeten elkaar vinden en daarvoor zijn verschillende aanleidingen, aansluitmomenten en samenwerkingsarrangementen denkbaar met elk hun eigen dynamiek. Aan het begin van de ontwerptrechter moet voldoende tijd beschikbaar zijn voor zogenaamde beleidsarrangementen tussen gebiedspartners. Deze bestaan uit afspraken over de projectscope, budget en de gebiedsambities. Dergelijke zaken spelen in een voorverkenning of zelfs voorafgaand aan de HWBP-ingangstoets. Door het vroegtijdig betrekken van marktpartijen is er voldoende tijd voor het grondgestuurd ontwerpen.

Wat ook blijkt uit Figuur 3 is dat de mogelijkheden voor het gebruik van gebiedseigen grond het grootst zijn aan het begin van de ontwerptrechter. Grondaanbieders hebben ook andere afzetmarkten voor grond. Als je laat instapt, is de kans groter dat lokaal beschikbare grond naar andere markten wegvloeit, of dat de scope en planning het niet meer toestaan. Eerder instappen zorgt voor meer vrijheden en kansen voor grondgestuurd ontwerpen. Toch sluit laat instappen de mogelijkheden voor grondgestuurd ontwerpen niet uit.

In de volgende paragrafen leest u aan de hand van voorbeelden welke mogelijkheden en kansen er zijn voor grondgestuurd ontwerpen tijdens de voorverkenning, het ontwerpproces en de realisatie.

2.4 Kansen tijdens de voorverkenning

Bij richtlijn gestuurd ontwerpen is de (voor)verkenning fase gericht op informatie verzamelen om de waterveiligheid voor de faalmechanismen in de ontwerprichtlijnen te kunnen berekenen. Grondgestuurd ontwerpen daarentegen vraagt vroegtijdig om informatie over het grondaanbod in de regio. Hierna beschrijven we een aantal mogelijkheden en voorbeelden hoe bij de start van het project al kan worden gekeken naar gebiedseigen grond.

2.4.1 Dijkversterking met gebiedspartners

In veel succesvolle voorbeelden met gebiedseigen grond trekt het dijkversterkingsproject in een vroegtijdig stadium gelijk op met een gebiedspartner die een opgave heeft waarbij grondaanbod ontstaat. Een instrument om deze mogelijkheid snel in beeld te krijgen, is de Kansenscan (zie paragraaf 2.4.3). Deze wordt bij voorkeur toegepast in de fasen einde beoordeling tot aan voorverkenning.

Voorbeelden optrekken met gebiedspartners

*Bij de **Gebiedsontwikkeling Ooijen-Wanssum** heeft de dijkversterking vanaf de start parallel gelopen aan de gebiedsontwikkeling. De provincie Limburg en Waterschap Limburg trokken hierbij samen op. Hierdoor kon grondaanbod binnen het gebied volledig worden gekoppeld aan de dijkversterking. Dit heeft geleid tot een ontwerp dat geheel is aangepast aan de gebiedseigen grond. In plaats van een klassieke taludbekleding van stevige klei is een robuuste erosiebuffer van gebiedseigen grond toegepast. Op deze manier kon een wens vanuit de ruimtelijke kwaliteit worden ingevuld: het aanbrengen van een steilrand (steile oeverrand), die kenmerkend is voor dit gebied. Het onderzoek naar de geschiktheid van de vrijkomende grond is vroeg gestart. Dat zorgde voor een snelle vaststelling van de haalbaarheid en een soepel ontwerptraject.*

*Bij de **Dijkversterking Grebbedijk** heeft Waterschap Vallei en Veluwe samen met de gemeente Wageningen en de provincies Utrecht en Gelderland onderzocht of de verbetering van de Grebbedijk ook kansen bood voor andere ruimtelijke opgaven en gebiedsambities. Een koppeling met de KRW-opgave (Rijkswaterstaat) en natuurontwikkeling (Staatsbosbeheer) werd in een vroeg stadium gemaakt. Vroegtijdig grondonderzoek in de uiterwaarden heeft ertoe geleid dat de positie van de nevengeul kon worden afgestemd op winlocaties voor dijkmateriaal, met behoud van de doelstellingen voor natuurontwikkeling, sport en recreatie.*

2.4.2 Vroege start

Het eerste beeld van de grondvraag ontstaat na de beoordeling bij de HWBP-ingangstoets wanneer trajecten worden aangemeld voor subsidie. Deze ingangstoets is breder dan alleen het beoordelen van de stabiliteit van de scope van de versterkingsopgave. Ook de projectomgeving maakt deel uit van de ingangstoets. Het is daarom aan te bevelen om het onderzoek naar kansen voor het toepassen van regionaal beschikbare grond op te starten voorafgaand aan de ingangstoets. Het project kan dan al veel duidelijker de kansen voor het gebruik van gebiedseigen grond meewegen aan het begin van het ontwerpproces.

2.4.3 Kansenscan en Kansenskaart

De HWBP-ingangstoets en de daaropvolgende periode van programmeren is een goed moment om de Kansenscan uit te voeren. Dit is een manier om overzicht te krijgen in projecten met een potentiële grondvraag en/of -aanbod die gaan spelen. Een Kansenscan geeft voor een gebied – bijvoorbeeld een rivier(tak) zoals de Waal, Nederrijn of de Maas – schetsmatig de plannen weer voor dijkversterking, Kaderrichtlijn Water (KRW)-maatregelen, gebiedsontwikkeling, grondvoorkomens, eigendommen, (natuur)wetgeving etc. Ook wordt aangegeven waar grond nodig is en waar grond vrijkomt. Op basis van deze scan kan een project, zelfs al voordat het echt gestart is, verkennen waar de mogelijkheden, globale kansen en risico's van het toepassen van gebiedseigen grond liggen.

Het inventariseren van potentiële grondvraag en -aanbod in een gebied kan op verschillende manieren worden aangepakt. Hier komen de gebruikelijke middelen van de omgevingsmanager aan bod, zoals praten met stakeholders, boeren en lokale aannemers en grondhandelaren; het onderzoek naar ontwikkelplannen bij overheidsinstanties; het raadplegen van digitale informatiebronnen zoals www.ruimtelijkeplannen.nl, etc.

Om de kansen en de bijbehorende risico's scherper in beeld te krijgen, kan vervolgens voor een project in meer detail een Kansenskaart worden gemaakt. Dit kan door in te zoomen op het gebied: van rivier(tak) naar gebiedsniveau naar projectniveau. Maar ook door te kijken naar meer specifieke details van de vrijkomende en benodigde grond: volumes, grondeigenschappen, eigendom etc. Hiermee kan de grondbalans van een individueel project concreter worden gespecificeerd waardoor de kansen in beeld komen om met andere projecten te koppelen.

Het streven is om een 'inzoombare' Kansenskaart te maken, waarbij het informatieniveau per fase toeneemt. Idealiter vindt een eerste Kansenscan al plaats op programmaniveau. Op dat moment kan in een groter gebied worden gekeken naar de grondaanbieders en grondvragers. Dat is ook hét moment om het zoekgebied vast te stellen waarmee de individuele projecten verder kunnen. In de voorverkenning van een dijkversterkingsproject vindt verdere inventarisatie plaats.

Na de start kan voor iedere volgende projectfase nieuwe en concretere informatie toegevoegd worden. Door deze 'inzoombare' opzet is het raamwerk in elke fase bruikbaar.

Wanneer een kansenskaart projectspecifiek wordt gemaakt, dan ligt het voor de hand deze verder uit te bouwen met GIS-kaartbladen die steeds concretere en gedetailleerdere informatie bevatten. Daarbij valt te denken aan:

- Beschrijving van beschikbare wingebieden inclusief gebiedseigenaren.
- Restricties aan winning: vergunbaarheid in het kader van ontgrondingen, beschermde natuurgebieden, archeologie, niet-gesprongen explosieven, zonen van voorland vanuit effecten op waterveiligheid.
- Beschrijving aard van potentieel winmateriaal.

Voorbeeld Kansenscan

*De POV-DGG heeft voor de **Nederrijn-Lek** een Kansenscan op rivierniveau uitgevoerd, zie figuur 4. Daarbij zijn verschillende databases gebruikt, zoals die van voorkomende typen en laagdikten van het sediment in de uiterwaarden, eigendomskaarten, dijkversterkingstrajecten, KRW-projecten en grenzen van Natura 2000-gebieden. Door deze database vroegtijdig (vóór of tijdens de verkenningsfase) te raadplegen, zijn de koppelingen tussen versterking en grondleverende projecten op tijd in beeld. De volgende stap is om in meer detail met een kansenskaart op het gebied in te zoomen en te onderzoeken wat de exacte eigenschappen van het vrijkomende sediment zijn. Denk hierbij aan cohesie, organische stofgehalte, zoutgehalte, volumes. Of aan informatie als kansrijkheid van verwerving (wie is eigenaar), ontginning (welke natuurdoelen zijn vastgelegd) en risico's, zoals eventuele vervuiling of afstemming van planning.*



Figuur 4 Kansrijke projecten in uiterwaarden Nederrijn-Lek; een overzicht van de verschillende projectlocaties

2.4.4 Aandachtspunten bij vroegtijdig koppelen vraag en aanbod

Uit inventarisaties van de bestaande praktijk komt het volgende beeld naar voren, zie [3]:

- De hoeveelhedenramingen bevatten veel onzekerheden. Zowel de hoeveelheid beschikbare grond als de hoeveelheid benodigde grond kan aanvankelijk vaak niet nauwkeurig worden bepaald.
- In de voorverkenningfase van de ontwerptrechter is zelden sprake van een sluitende grondbalans, hoewel de voorverkenning hier in beginsel wel de ruimte voor biedt.
- Grondkoppeling binnen één project is vaak makkelijker dan tussen verschillende projecten, omdat minder onderlinge afstemming nodig is over planning, hoeveelheden, overdracht en kwaliteit. Een combinatie van een dijkversterking met een gebiedsontwikkeling is een manier om tot efficiënter hergebruik van grond te komen.

Het is van belang om de onzekerheden in grondvraag en -aanbod zo goed mogelijk in beeld te krijgen en deze vervolgens te verkleinen. Daarbij kan gedacht worden aan:

- Uitdrukken van de dijkversterkingsopgave in bandbreedtes (onder- en bovengrens). Dit is met name in de verkenningsfase van een dijkversterkingsproject een aandachtspunt. Bij een aanpak 'van grof naar fijn' is de bovengrens van de omvang van de versterkingsopgave in de verkenningsfase meestal aanzienlijk ruimer dan in de planuitwerkingsfase nadat meer optimalisatiemogelijkheden zijn uitgewerkt.
- Tijdig verzamelen van informatie over grondkwaliteit (fysisch en milieutechnisch).
- Niet te snel beperken van de ontwerpvrijheid van de dijkversterking.
- Niet te snel 'dichttimmeren' van het landschappelijk ontwerp. Intensieve dialoog tussen landschapsarchitect en technisch ontwerper over de kansen voor gebiedseigen grond in relatie tot de vorm van de dijk en het landschap daaromheen is daarbij essentieel.
- Bedenken van terugvalscenario's in geval van grondoverschot of -tekort.
- Onderzoeken van mogelijkheden voor specie-uitwisseling binnen een project.
- Tijdig bewerken van grond in depot.

2.5 Kansen tijdens het ontwerpproces

Tijdens de verkenningsfase wordt echt gestart met het ontwerpproces van de dijkversterking en ontstaat meer zicht op de grondvraag. Aan het begin van het ontwerpproces ligt de focus op een juiste keuze voor een voorkeursalternatief en het bijbehorende (maximale) ruimtebeslag. Juist in deze fase is het van belang om

grondgestuurd te ontwerpen. Het principe-ontwerp krijgt dan gestalte en dat is voor een belangrijk deel bepalend voor de benodigde hoeveelheid grond en het type materiaal. Het is dan van belang om een beter inzicht te hebben in de grondeigenschappen van dominante partijen winbare grond. Bij het uitwerken van het voorkeursalternatief in de uitwerkingsfase kunnen hoeveelheden en materiaalkeuze nog worden bijgesteld. In hoofdstuk 5 leest u meer over het effect van principiële ontwerpkeuzen op de grondvraag en mogelijkheden voor het toepassen van gebiedseigen grond.

Voorbeeld grondgestuurd ontwerpen tijdens het ontwerpproces

*In het project **Dijkversterking Gorinchem - Waardenburg (GoWa)** is het hele ontwerpproces van verkenning tot realisatie in een alliantie van ontwerpers, bouwers en Waterschap Rivierenland uitgevoerd. Het projectgebied kenmerkt zich door lintbebouwing langs de dijk en een afwisseling van schaar dijken en dijken met uiterwaarden. Vanwege deze kenmerken en de voorkeur om met grond als versterkingsmateriaal te werken, is een buitenwaartse asverschuiving op veel plekken het voorkeursalternatief. In de uiterwaarden waren er mogelijkheden voor rivierverruiming waarmee de rivierkundige effecten van de buitendijkse verzanding binnen het project konden worden gecompenseerd. Daarnaast was er een wens voor natuurontwikkeling, deze kon worden gerealiseerd door uiterwaardvergravingen. Hiermee ontstond ook de mogelijkheid om grondstromen voor een deel binnen het project te laten plaatsvinden: ontgraven grond uit de uiterwaarden kon worden toegepast in de dijkversterking. Grondgestuurd ontwerpen was hierbij al vroeg in het vizier en werd in de realisatiefase heel concreet.*

2.6 Kansen tijdens realisatie

In veel gevallen komt de grondaanbieder pas tijdens de realisatiefase in beeld. Het ontwerp is dan al gereed en de marktpartij zoekt naar partijen grond die voldoen aan de specificaties die uit het ontwerp volgen. Het voordeel is dat dit minder onzekerheden geeft over planning, benodigde hoeveelheden en de gewenste materiaaleigenschappen. De toepassingsmogelijkheden zijn in een later stadium concreter. Het nadeel is dat de mogelijkheden voor het toepassen van gebiedseigen grond aanzienlijk kleiner zijn geworden. Dit komt omdat de vrijheid voor grondgestuurd ontwerpen door de projectrandvoorwaarden tijd en ruimte sterk is beperkt. In dit stadium komt het ook vaak voor dat de aangeboden partijen net niet voldoen aan de standaard specificaties die het waterschap oplegt, bijvoorbeeld een Basis Specificatie Dijk (BSD), zie [4] en [5]. Dit komt vooral vaak voor bij het 'werk-met-werk' maken binnen het projectgebied. Te denken valt aan grond die vrijkomt uit de bestaande dijk door een asverschuiving en die elders in het project weer kan worden toegepast in de dijkversterking. Toch is grondgestuurd ontwerpen in dit stadium nog steeds mogelijk. Maar het gaat dan meer om het zoeken naar ruimte die de specificaties bieden (toleranties bij eisen) of om het naar een hoger niveau tillen van de eisen uit de Piramide van Eisen. De BSD laat vaak de mogelijkheid van *comply or explain* open. Wanneer aan de bovenliggende eis kan worden voldaan, dan wordt gebruikgemaakt van de *explain*-optie. Daarvoor is kennis van het grondgedrag en de functionele eisen van groot belang. De hoofdstukken 4 en 5 gaan hier uitgebreid op in.

Voorbeeld grondgestuurd ontwerpen vlak voor de realisatiefase

*Bij dijkversterking **Heel en Beesel van Waterschap Limburg** is een aannemer voor de realisatiefase gezocht, waarmee een engineering & construct (E&C)-contract is afgesloten. In de uitvraag is hergebruik van grond gestimuleerd via het verminderen van transportbewegingen. Daarop is ook aangeboden. Met als resultaat dat grondstromen uit Heel worden toegepast in Beesel, passend binnen de opgestelde vraagspecificatie eisen (VSE). De VSE liet de mogelijkheid open voor een ontwerp met toepassing van minimaal categorie 3 klei op de binnentaluds. Hiervan is gebruikgemaakt waardoor de vrijkomende grond uit Heel kon worden toegepast.*

2.7 Informatiebehoefte DGG

De ontwerper en beheerder hebben bij elke projectfase behoefte aan specifieke informatie (zie Figuur 3). Deze informatie is te achterhalen met risicogestuurd, geotechnisch onderzoek, waarvoor we een handelingsperspectief hebben ontwikkeld. Ook onderzoek naar de bestaande dijk kan benut worden.

2.7.1 Handelingsperspectief risicogestuurd onderzoek

Tabel 2 geeft een algemeen handelingsperspectief. Bij grondgestuurd ontwerpen is er in de verschillende ontwerpfasen onzekerheid over de kwantiteit en kwaliteit van de grondvraag en het grondaanbod. Deze technische uitdagingen en de bijbehorende informatiebehoefte staan centraal in de tabel. De opzet van Tabel 2 is beknopter en meer toegespitst op grondgestuurd ontwerpen dan het processchema uit het “Handelingsperspectief Geotechnisch Onderzoek” [6], maar sluit er wel goed op aan.

Uit de tabel wordt duidelijk dat juist in de fasen vanaf het einde van de beoordeling tot aan de voorverkenning, veel informatie nodig is. Zonder deze vroegtijdige focus komt het onderzoek pas op gang in de voorverkenning. Het lukt dan waarschijnlijk niet meer om een dijkversterkingsproject te koppelen aan een grondaanbiedende gebiedspartner, zie paragraaf 2.4.

In Tabel 2 worden onderzoekstechnieken slechts globaal omschreven. In hoofdstuk 3 en 4 komt dit uitgebreid aan bod.

Tabel 2 Voorbeeld van een handelingsperspectief risicogestuurd onderzoek voor grondgestuurd ontwerpen

| Fase | Centrale vraag | Informatiebehoefte (grondkennis) | Oplossing ontwerper/beslisser |
|--------------------------------|--|---|--|
| Voorgeschiedenis (beoordeling) | <ul style="list-style-type: none"> Zijn eigenschappen van bestaande dijk en gebied voldoende benut in beoordeling (stabiliteit van beoordeling)? | <ul style="list-style-type: none"> Monitor- en grondonderzoek-campagne voor veiligheidsanalyse met bijzondere aandacht voor onderzoek bestaande dijk | <ul style="list-style-type: none"> Beoordelen tot aan Toets op Maat |
| Programmering (traject) | <ul style="list-style-type: none"> Is er potentie om projecten met grondvraag en grondaanbod vanuit gebiedsopgaven in de regio te koppelen? | <ul style="list-style-type: none"> Inzicht in kwantiteit van grondsoorten in potentiële winlocaties | <ul style="list-style-type: none"> Kansenscan op riviertak- of gebiedsniveau Koppelen dijkversterking aan potentiële gebiedspartners |
| Voorverkenning (projectopgave) | <ul style="list-style-type: none"> Welke gebiedsopgaven kunnen worden gekoppeld aan versterkingsopgaven? Kan grondvraag dijkversterking worden gerealiseerd met vrijkomende grond uit het gebied? (Is er een ontwerp mogelijk om met beschikbare grond te werken?) | <ul style="list-style-type: none"> Onderzoek naar kwantiteit en kwaliteit van te winnen grond, inclusief de onzekerheden in classificatie | <ul style="list-style-type: none"> Kansenscan en kansenskaart op projectniveau Risicoprofiel gebiedseigen grond |
| Verkenning (komen tot VKA) | <ul style="list-style-type: none"> Is een grondgestuurd ontwerp het voorkeursalternatief (VKA)? | <ul style="list-style-type: none"> Grondonderzoek afstemmen op ontwerpbepalende eigenschappen van toe te passen grond. <p>NB. Het detailniveau van het grondonderzoek moet voldoende zijn voor het vaststellen van de kansrijkheid van het VKA</p> | <ul style="list-style-type: none"> Alternatieven uitwerken zowel grond- als richtlijngestuurd en alternatieven afwegen Onderzoeksstrategie opzetten voor toetsen grondgestuurd ontwerp met aandacht voor en beheersmaatregelen |

| Fase | Centrale vraag | Informatiebehoefte (grondkennis) | Oplossing ontwerper/beslisser |
|--|---|---|--|
| Planuitwerking (projectplan/ projectbesluit) | <ul style="list-style-type: none"> • Voldoende vertrouwen in grondgestuurd alternatief? Ofwel: worden gewenste gedragseigenschappen aangetoond? • Wat zijn beheersmaatregelen (terugvalopties)? | <ul style="list-style-type: none"> • Grondonderzoek afstemmen op verificatieplan, rekening houdend met verouderingsmarges • Dit onderzoek is gericht op de functionele eisen en kan bijvoorbeeld grootschalige systeemtesten omvatten | <ul style="list-style-type: none"> • Onderzoek uitvoeren en indien nodig ontwerp aanpassen • Nagaan of beheersmaatregelen moeten worden ingezet • Verificatieplan voor uitvoering opstellen |
| Realisatiefase (opleveren veilige dijk) | <ul style="list-style-type: none"> • Voldoet het op te leveren werk aan de eisen uit het verificatieplan? Zijn beheersmaatregelen ingezet waar nodig? | <ul style="list-style-type: none"> • Proefophogingen, partijkuringen en verdichtingsonderzoeken | <ul style="list-style-type: none"> • Verificatieplan toepassen • Opleverdossier opstellen • Concept beheer- en onderhoudsplan opstellen • Nazorg |
| Beheer (zorgplicht) | <ul style="list-style-type: none"> • Voldoet de dijk aan wensen beheer- en waterveiligheidseisen tijdens de levensduur? | <ul style="list-style-type: none"> • Inspectie en monitoring • Monitoring bij extreme belastingen (droog en nat) | <ul style="list-style-type: none"> • Uitgangstoets opleverdossier • Monitoring prestatie en verouderingsgedrag • Beheersmaatregelen • Periodieke beoordeling |

2.7.2 Onderzoek bestaande dijk

Het onderzoek naar gebiedseigen grond begint eigenlijk al ruim voor de ingangstoets. Het start met het onderzoek naar de dijk zelf tijdens de periodieke beoordeling op waterveiligheid, kortweg de beoordelingsfase. Deze onderzoeksresultaten kunnen zeer gedetailleerde gegevens bevatten van de dijkmaterialen, zoals grondonderzoek, oude dijkversterkingsrapporten en -tekeningen, historische beschrijvingen, fysisch geografische informatie, observaties van dijkgedrag en andere gegevens uit het dijkbeheer. Al deze informatie is bruikbaar voor een pipingtoets of het opzetten van een geohydrologisch model om geotechnische faalmechanismen te beoordelen. Ook archeologisch onderzoek, dat tevens de historie van de dijkversterking grondig bekijkt, kan zeer belangrijke informatie geven over de opbouw en het gedrag van de dijk. Dit kan met een geoscan. Waterschap Noorderzijlvest bijvoorbeeld heeft een geoscan gemaakt voor diverse zeedijken, inclusief een handreiking voor een dergelijke aanpak [7]. De informatie over de dijkmaterialen en het ophoogverleden is heel belangrijk voor latere ontwerpkeuzes, zoals voor het principeontwerp van de dijk.

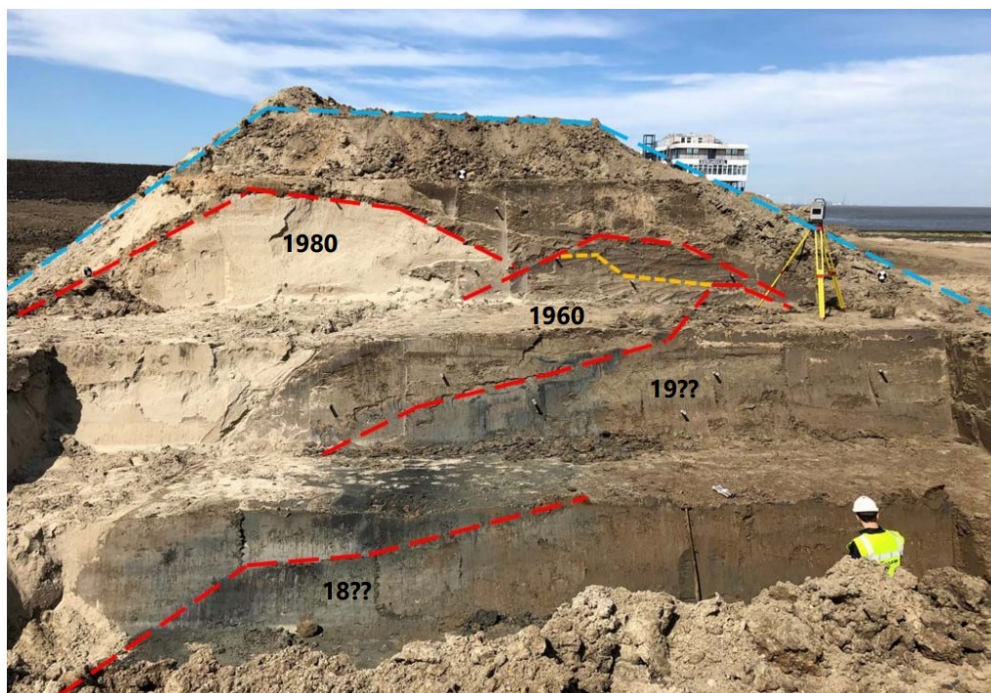
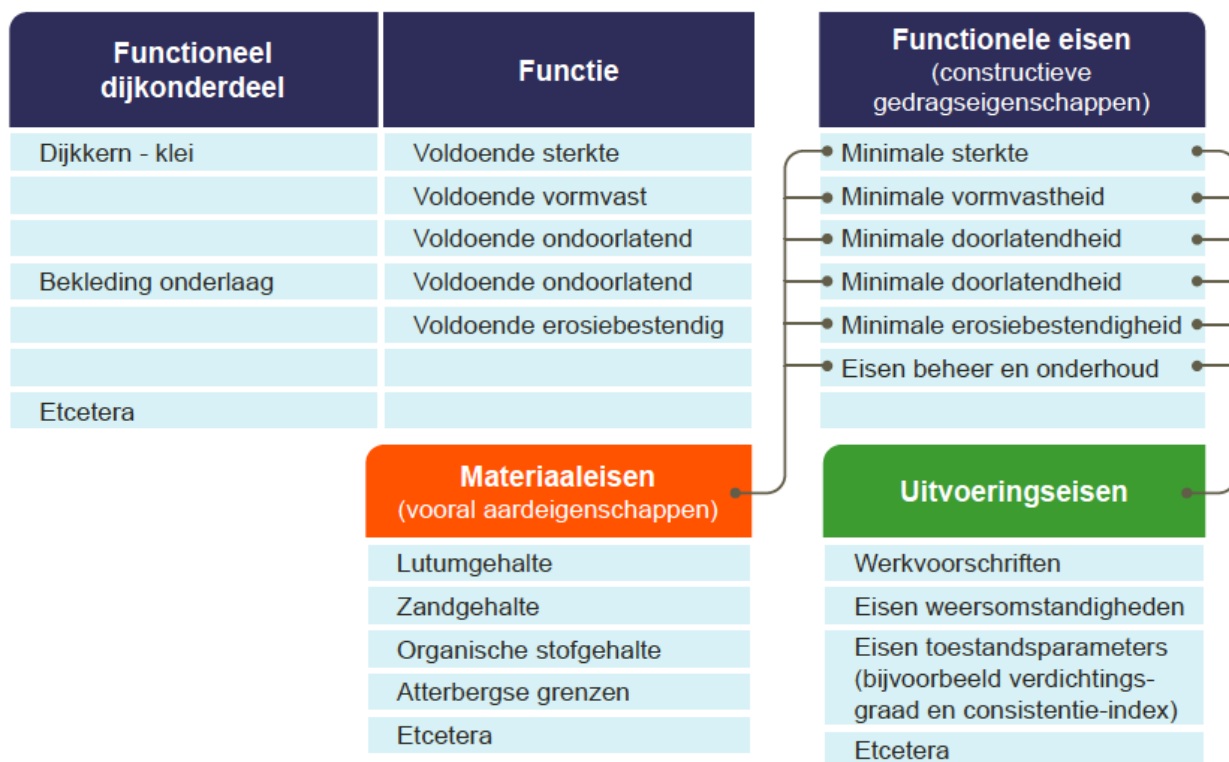


Foto 2 Geoscan van oude kleidijk bij Marconi met verschillende historische versterkingslijnen (bron: [7])

Aan het begin van de ontwerptrechter zal de inventarisatie van grondvraag en -aanbod vrij globaal van aard zijn. De gegevens die zijn verzameld bij de beoordeling, geologische en geomorfologische kennis, aangevuld met ervaringen uit dijkversterkingen uit het verleden en informatie van grondleveranciers uit de regio, kunnen dan al voldoende zijn voor een eerste schatting. Bij verdere afbakening en vaststelling van het zoekgebied op project- of trajectniveau ontstaat meer behoefte aan systematisch en geotechnisch classificeren en specificeren, in hoofdstuk 3 wordt hier nader op ingegaan. Wanneer het proces van grondgestuurd ontwerpen wordt gestart, kan specifiek naar eigenschappen van partijen grond worden gekeken vanuit functionele eisen en constructieve eigenschappen van het materiaal, zie paragraaf 2.8.

2.8 Vertalen van grondaanbod naar toepassingsmogelijkheid in het ontwerp

Voor een goed integraal dijkontwerp is het belangrijk dat de ontwerper zich bewust is van de relatie tussen functionele eisen en de gestelde eisen in standaardspecificaties. Figuur 5 geeft schematisch de samenhang weer tussen de functionele eisen op het niveau van constructieve gedragseigenschappen per dijkonderdeel en de onderliggende materiaal- en uitvoeringseisen.



Figuur 5 Van functionele eisen naar materiaal- en uitvoeringseisen

Top-down of bottom-up ontwerpen

Een andere weergave van de samenhang tussen eisen op verschillende abstractieniveaus is de Piramide van Eisen, zie de linker piramide in Figuur 6. Dit betreft het ontwerpen via een klassieke piramide van **eisen**, oftewel richtlijn gestuurd ontwerpen. De rechter piramide laat de werkwijze bij grond gestuurd ontwerpen zien, op basis van beschikbare **eigenschappen** van de grond in plaats. Dit lijkt op ontwerpen zoals het in enkele omliggende landen (Verenigd Koninkrijk en Frankrijk) meer gebruikelijk is.

De manier van ontwerpen, op basis van eisen of eigenschappen, heeft effect op de vorm van dijken. Ook gebiedskenmerken hebben hier effect op. Voorbeelden van deze gebiedskenmerken zijn:

- Hydraulische belastingen.
- Beheer en de verouderingsbelasting (harde of zachte bekleding).
- Geohydrologische situatie (bij hoogwater).
- Ondergrond.
- Bodemkundige en botanische gebiedseisen.
- Gebruikelijke bouwmethode en beschikbaar materieel.



Figuur 6 Top-down ontwerpen volgens Piramide van Eisen (links) of bottom-up via eigenschappen (rechts) waarmee de verschillen in beeld zijn

In hoofdstuk 4 wordt in meer detail ingegaan op de samenhang tussen constructieve eigenschappen, elementaire gedragseigenschappen en aardeigenschappen en op het inbrengen van bodemkundige kennis en ervaring bij het vaststellen van constructieve gedragseigenschappen op langere termijn.

Contractvorm en technisch specificeren

De technisch manager heeft een belangrijke link met de contractmanager. Zij werken nauw samen bij het kiezen van de contractvorm en de wijze van technisch specificeren. In de dijkenwereld is het gebruikelijk om te specificeren op het niveau van elementaire gedragseigenschappen, aardeigenschappen en uitvoeringseisen (zie Figuur 6 onderste blokjes). In de toelichting bij technische specificaties wordt soms de link naar functionele eisen beschreven maar vaak ontbreekt dit. Wel is er een trend naar het meer functioneel specificeren in een groeiend aantal *design & construct* (D&C)- en UAV-gc-contracten. Ook worden stappen gezet door het uniformeren van eisen. Het initiatief HEEL [4] is daar een sprekend voorbeeld van. Binnen HEEL werken waterschappen en Rijkswaterstaat aan het versterken en uniformeren van de Systems Engineering-werkwijze bij het opstellen van basisspecificaties voor dijkversterkingen. Bij HEEL wordt er vanuit de Piramide van Eisen gedacht.

Het star vasthouden aan standaard materiaaleisen zonder koppeling met functionele eisen voor het betreffende dijkonderdeel, staat het gebruik van gebiedseigen grond vaak in de weg. Daarnaast is de koppeling met functionele eisen zeer relevant bij het bepalen van de toleranties die horen bij de eisen. In de praktijk komt het namelijk nog wel eens voor dat aangebrachte grond net niet voldoet aan de vooraf vastgestelde standardeisen. Een *zero tolerance*-eis kan dan grote implicaties hebben en nuancering van de eisen is dan gewenst. In het rapport “Vier Quick Wins grond en klei” [8] worden hiervoor handvatten gegeven.

Bij contractvormen zoals E&C en vooral D&C kan en zal de opdrachtgever op een hoger niveau eisen specificeren, zoals op het niveau van functionele eisen (zie Figuur 6, bovenste blok). Hiermee komt meer verantwoordelijkheid te liggen bij de opdrachtnemer. Door deze verplaatsing van ontwerpverantwoordelijkheden ontstaan niet automatisch meer kansen voor het grondgestuurd ontwerpen. Zonder prikkel of voldoende ruimte in de planning, zal de opdrachtnemer vanuit risicobeheersing vaak terugvallen op gebruikelijke eisen aan constructieve eigenschappen. In “Analyse succesfactoren en gebiedspotentieel dijkversterking met gebiedseigen grond” [1] worden aanbevelingen gedaan om deze prikkels en ruimte in te bouwen.

Robuustheid in de eisen

Voor een ontwerper is het belangrijk om rekening te houden met de verouderingsprocessen in de grond en het effect daarvan op de constructieve gedragseigenschappen. Structuurvorming heeft bijvoorbeeld effect op doorlatendheid en sterkte. In paragraaf 4.4 wordt dit beschreven. In standaard-eisen zit al robuustheid verwerkt zodat verouderingseffecten kunnen worden geïncasseerd en de waterkerende functie ook in de toekomst gegarandeerd blijft. Dit is een aspect dat niet over het hoofd moet worden gezien, in het bijzonder bij grondgestuurd ontwerpen vanuit grondeigenschappen van lokaal beschikbare grond die niet per definitie aan standaard-eisen voldoet (werkwijze volgens rechter piramide in Figuur 6). De ontwerper dient dus rekening te houden met veroudering van de constructieve gedragseigenschappen en het is onvoldoende om uitsluitend te ontwerpen op de meetwaarden van eigenschappen tijdens de uitvoering.

Grondgestuurd ontwerpen vereist bodemkundige kennis

Het raadplegen van een bodemkundige met gedegen kennis van verouderingsprocessen is essentieel bij het bottom-up ontwerpen volgens het concept van grondgestuurd ontwerpen.

Bij sterk veranderende belastingen, zoals extreme droogte, geldt overigens ook bij het traditionele top-down ontwerpen dat eisen nog eens zouden moeten worden getoetst op verouderingseffecten.

In paragraaf 5.2 staan enkele voorbeelden van het toevoegen van robuustheid in het ontwerp om zo te compenseren voor het (net) niet bereiken van de vereiste aardeigenschappen. In deze gevallen wordt geredeneerd vanuit constructieve gedragseigenschappen van een functioneel dijkonderdeel en vanuit het integraal dijkontwerp.



3 Classificeren van grond in Nederlandse dijken

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de afspraken die in Nederland zijn gemaakt over het karakteriseren en de naamgeving van grond. Het is belangrijk dat iedereen dezelfde definities hanteert, om goede afspraken over de toepassing van grond te kunnen maken. Daarnaast lichten we toe welke grondsoorten in Nederland voorkomen en welke we meestal in en bij dijken tegenkomen.

De nadruk ligt op de beschrijving van fijne gronden (klei, leem/silt, keileem). Grove grondsoorten (zand en grind) en veen/organisch materiaal worden alleen op hoofdlijnen behandeld. Secundaire materialen, zoals AEC-bodemas en niet in Nederland voorkomende grondsoorten zoals bims en flugsand, worden niet beschreven.

We lichten in de volgende paragrafen eerst de oude NEN 5104-classificatiemethode toe, gevolgd door de nieuwe NEN-EN-ISO 14688. Beide methodes zijn niet specifiek bedoeld voor dijksmateriaal. Daarom beschrijven we aanvullend de definities bij de beschrijving van grond in dijken. Tot slot leest u hoe van een partij grond kan worden bepaald of deze geschikt is voor bepaalde toepassingen in dijken, inclusief een opsomming van beproevingsmethodes.

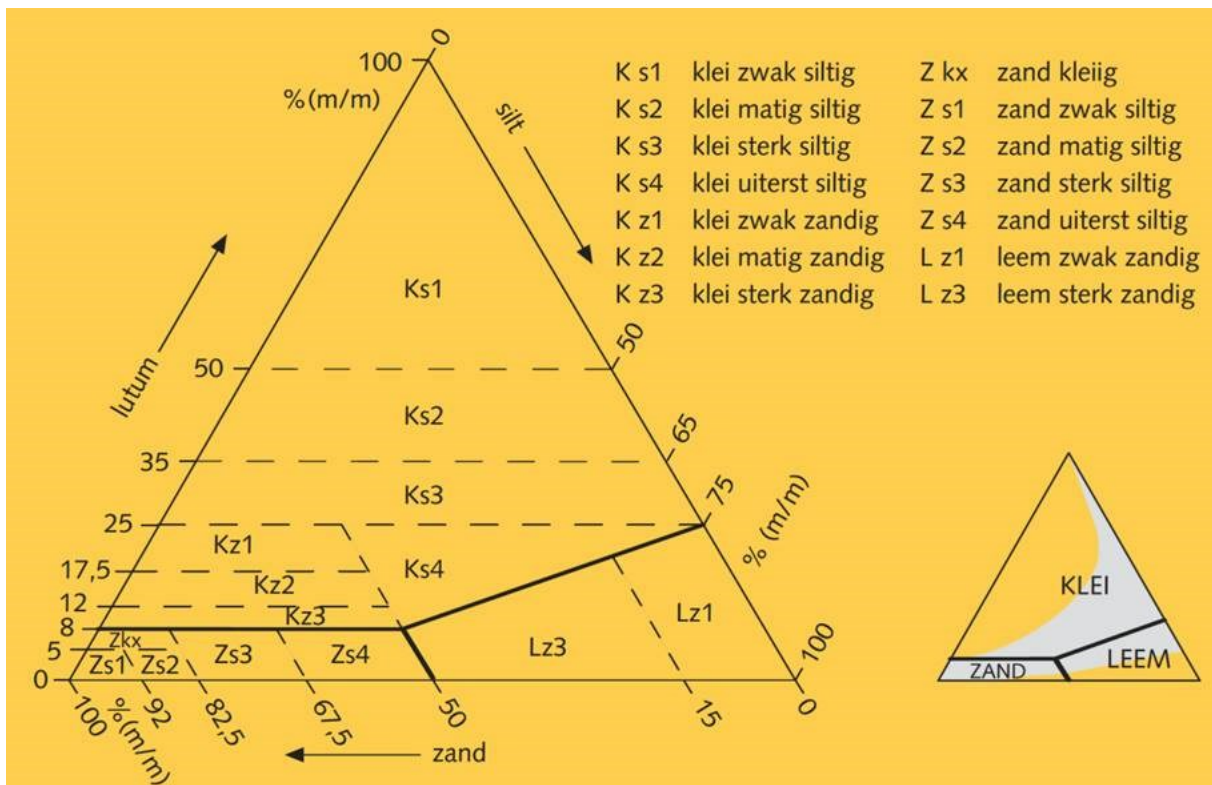
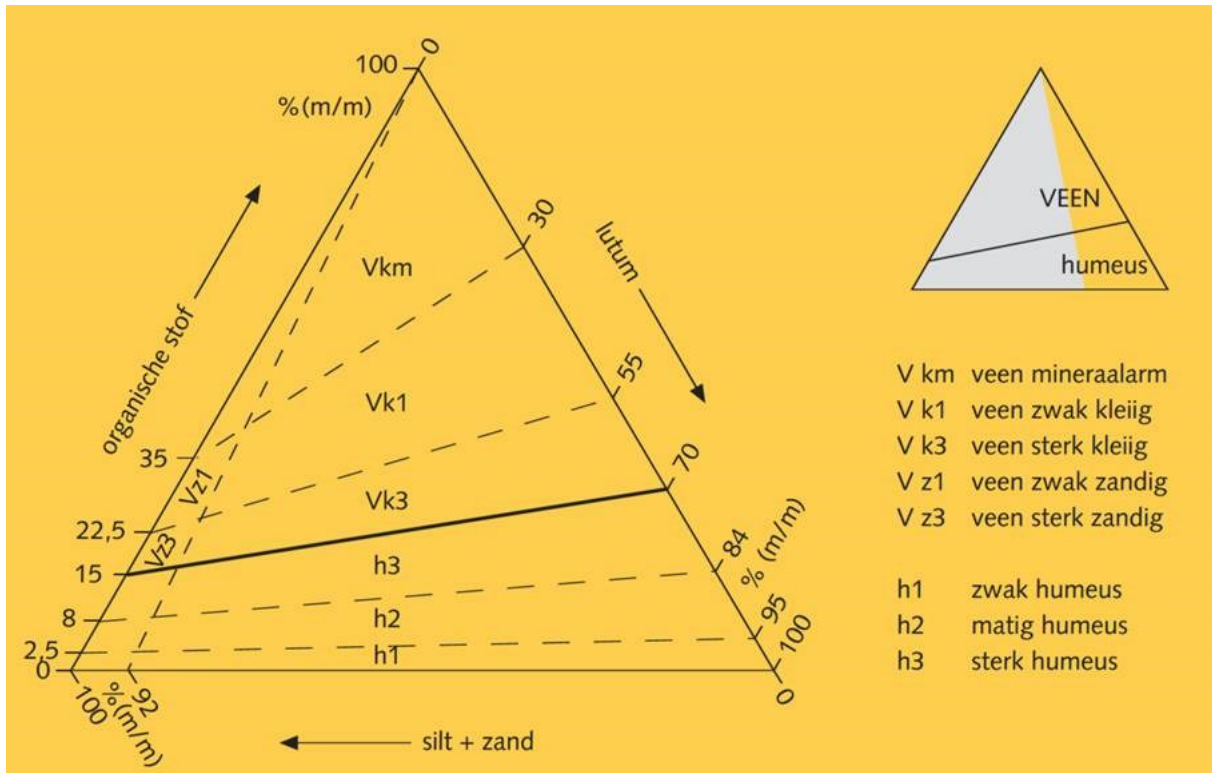
3.2 Oude methode voor classificatie van grond: NEN 5104

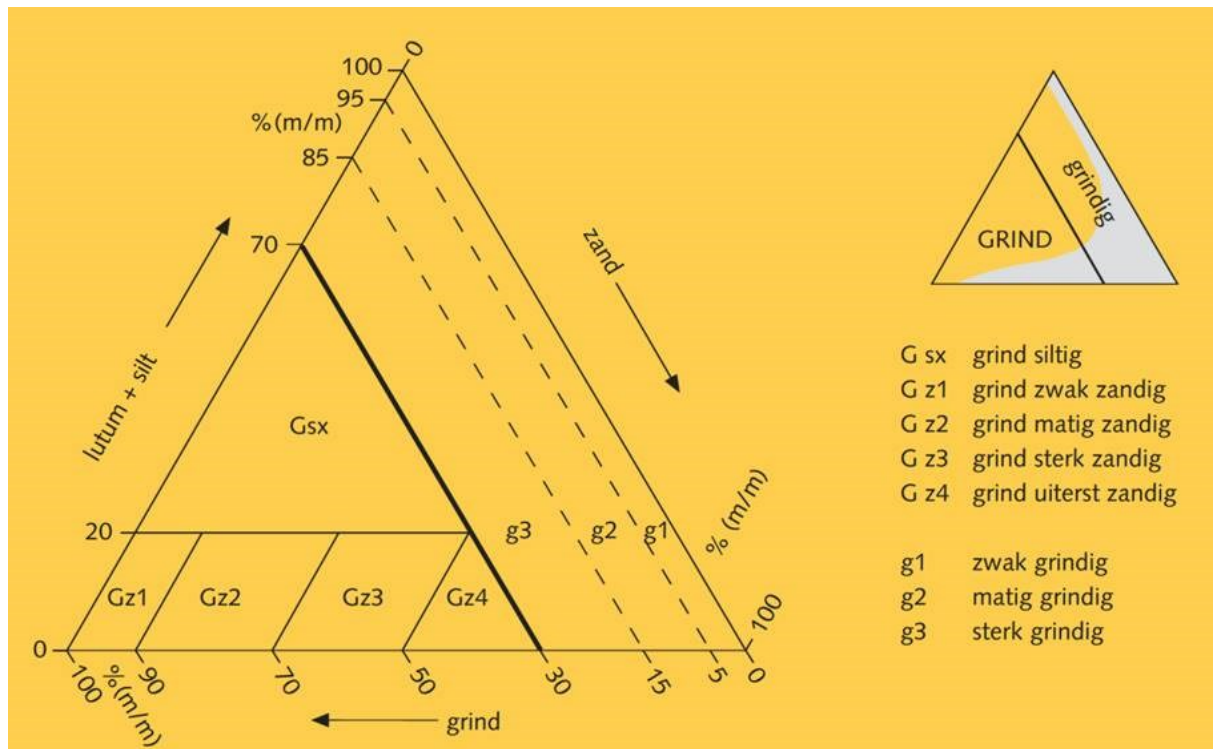
Tussen 1989 en 2019 werd NEN 5104 “Geotechniek, classificatie van onverharde grondmonsters” [9] gebruikt. Daarna is deze vervangen door NEN-EN-ISO 14688 [10].

In NEN 5104 staat hoe grond in Nederland kan worden beschreven, zie Figuur 7. Hoewel deze systematiek niet meer geldt, wordt deze hier toch toegelicht. Ten eerste is er op dit moment sprake van een overgangsfase naar NEN-EN-ISO 14688, waarin geleidelijk deze nieuwe norm wordt ingevoerd bij organisaties. Bij langlopende projecten wordt deze oude norm nog toegepast om trendbreuk te voorkomen. Ten tweede geldt dat bestaande grondonderzoekresultaten die met NEN 5104 zijn geclassificeerd, nog lang in de archieven aanwezig blijven en dus worden geraadpleegd.

In de NEN 5104-classificatiemethode is de grondbenaming onderverdeeld in een hoofdnaam, een toevoeging van een grondbijmenging en toevoegingen van andere bijmengingen. Hoofdnaam en grondbijmenging zijn afhankelijk van de gehalten grind ($> 2000 \mu\text{m}$), zand ($63 \text{ à } 2000 \mu\text{m}$), silt ($2 \text{ à } 63 \mu\text{m}$), lutum ($< 2 \mu\text{m}$) en humeus materiaal (organische stof). Elk grondmonster kan worden geprojecteerd in drie gronddriehoeken op basis van een schatting of bepaling van deze gehalten, zie Figuur 7. In de beschrijving van grond kunnen daarnaast andere bijmengingen (puin, hout, etc.) en eigenschappen (kleur, geur, etc.) worden vermeld. Bij elke gronddriehoek is met arceringen weergegeven welke grondsoorten er van nature in Nederland voorkomen.

Het voordeel van NEN 5104 is dat de visuele classificatie direct gerelateerd is aan de samenstelling. Hierdoor kan de samenstelling objectief worden gecontroleerd met behulp van laboratoriumproeven. Een nadeel is dat het lastig is om visueel onderscheid te maken tussen bepaalde grondsoorten. Ook worden sommige relevante grondeigenschappen, zoals de Atterbergse grenzen, niet beschreven.





Figuur 7 Gronddriehoeken NEN 5104 (bron: grondsoorten en delfstoffen bij naam [11])

3.3 De geldende methode voor classificatie van grond: NEN-EN-ISO 14688

In 2020 is Nederland overgestapt naar NEN-EN-ISO 14688 "Geotechnisch onderzoek en beproeving - Identificatie en classificatie van grond" [10]. Sindsdien is er een wettelijke verplichting voor overheidsinstanties om grondonderzoeksresultaten in dit format te leveren aan de Basisregistratie Ondergrond (BRO).

De nieuwe norm bestaat uit twee delen:

- Deel 1: Identificatie en beschrijving. Hierin wordt grond beschreven aan de hand van een visuele beschrijving.
- Deel 2: Grondslagen voor classificatie. Hierin wordt grond beschreven op basis van de resultaten van laboratoriumproeven (indextesten).

Er waren meerdere redenen om NEN-EN-ISO 14688 op te stellen:

- De methode sluit beter aan bij de Europese normen.
- Het onderscheid tussen identificeren en classificeren leidt tot meer objectiviteit en reproduceerbaarheid.
- De methode legt meer kenmerken van de grond vast.
- De methode legt eenduidig vast welke aspecten van de grond beschreven moeten worden, afhankelijk van de kwaliteit van een grondmonster. De kwaliteit van de beschrijving is daardoor hoger, omdat de beschrijver aan minimale ervarings- en kennis-eisen moet voldoen.
- Voor de monsternametechnieken gelden ook minimale kwaliteitseisen.

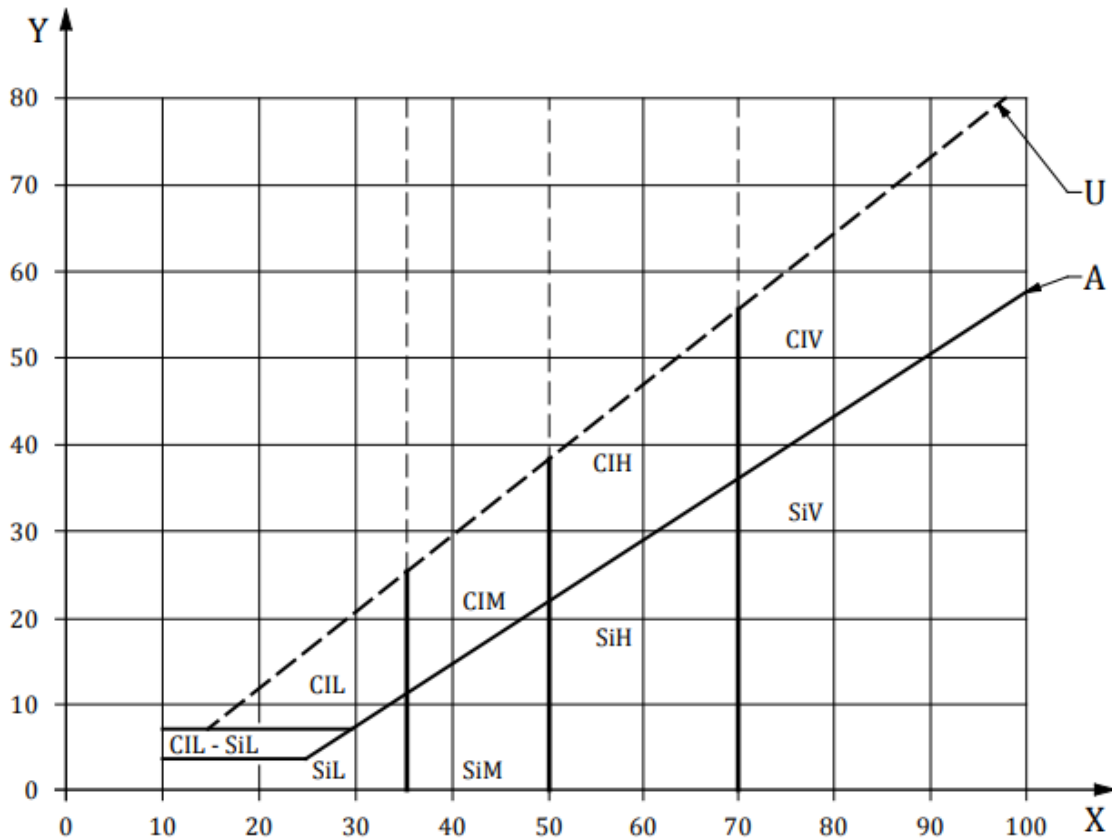
Door al deze redenen is de data toekomstbestendig en geschikt voor de vele digitale toepassingen.

Het belangrijkste nadeel is dat er sprake is van een trendbreuk. De definitie van grondsoorten (mengselsamenstellingen) is veranderd, waardoor de grondsoorten uit NEN-EN-ISO 14688 deel 1 niet één op één vergelijkbaar zijn met de grondsoorten uit NEN 5104. Enkele voorbeelden:

- Fijne gronden worden ingedeeld op basis van grondgedrag en niet meer op basis van percentages van de verschillende fracties (klei, silt, zand) waaruit de grond bestaat.

- De benaming van grond is ook deels veranderd en de grenzen tussen grondsoorten zijn veranderd.
- De grondsoort leem bestaat niet meer en heet nu silt. De term 'silt' was voorheen een aanduiding van de korrelgroottefractie.
- Het onderscheid tussen klei en silt is gebaseerd op de A-lijn uit de plasticiteitsgrafiek van Casagrande, zie onderstaand figuur.
- Er zijn meerdere organische grondsoorten dan alleen veen.

In de praktijk betekent dit dat bij gebruikmaking van oude bronnen, rekening moet worden gehouden dat er nu nieuwe termen gelden.



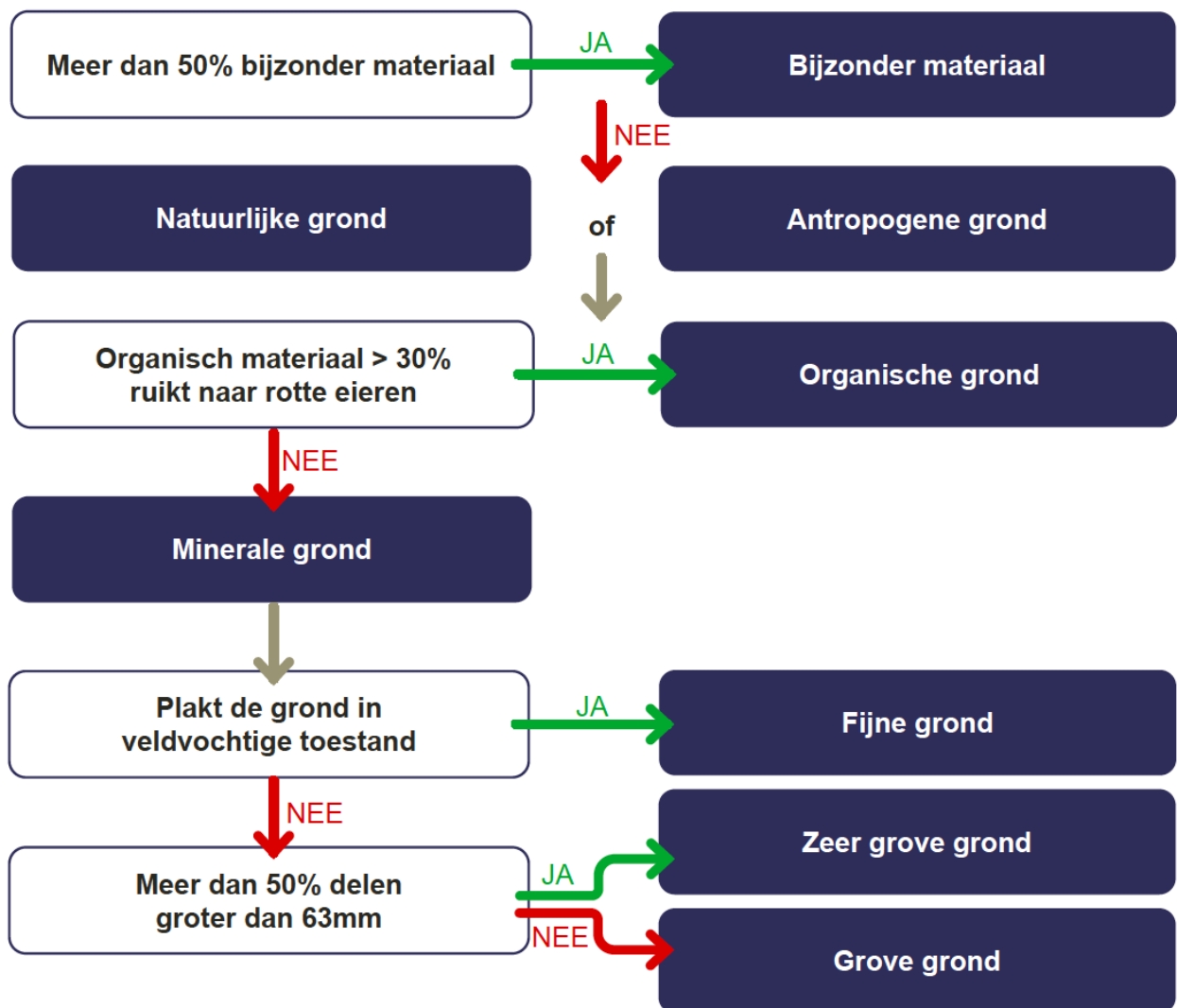
Legenda

| X vloeigrens, w_L | | Y plasticiteitsindex, I_P | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------|--|
| Grondsoort | | Plasticiteit | | Vloeigrens |
| Cl | Klei | L | Laag | < 35 |
| Si | Silt | M | Matig | 35 tot 50 |
| | | H | Hoog | 50 tot 70 |
| | | V | Zeer hoog | > 70 |
| | | O | Organisch | toevoegen aan classificatie voor organisch materiaal (bijvoorbeeld CIHO) |
| U-lijn | $I_P = 0,9 (w_L - 8)$ | | A-lijn | $I_P = 0,73 (w_L - 20)$ |

Figuur 8 Plasticiteitsgrafiek uit NEN-EN-ISO 14688-2

NEN-EN-ISO 14688-1: Identificatie en beschrijving [10]

De identificatie van grond verloopt volgens het stroomschema getiteld "NA1" uit de norm.



Figuur 9 Stroomschema voor identificatie volgens NEN-EN-ISO 14688-1

Eerst wordt onderzocht in welke mate de grond bijzondere bestanddelen bevat en of sprake is van natuurlijke of antropogene grond. Daarna wordt vastgesteld of sprake is van organische grond of minerale grond. Een belangrijk verschil is dat grond in NEN 5104 bij meer dan 15% organisch materiaal veen wordt genoemd. In NEN-EN-ISO 14688 daarentegen wordt pas bij meer dan 30% organisch materiaal gesproken over organische grond (waarvan veen een van de soorten is). Kleilig veen uit een NEN 5104-beschrijving kan daardoor in de nieuwe norm ineens klei of silt heten. Daarbij wordt opgemerkt dat een rotte eierengeur (de geur van waterstofsulfide: H₂S) niet in alle gevallen betekent dat de grond een hoog organisch stofgehalte heeft. In kustgebieden bijvoorbeeld is vaak sprake van waterstofsulfide zonder veel organische stof.

Als het gaat om minerale grond dan wordt bepaald of sprake is van fijne grond, zeer grove grond of grove grond. De minerale gronden zijn verdeeld in de volgende grondsoorten/fracties:

- Fijne grond (silt en klei).
- Grove grond (grind en zand).
- Zeer grove grond (keien, keitjes of grover).

Fijne gronden worden op basis van grondgedrag geïdentificeerd als klei of silt. Tabel 3 geeft de verschillen tussen klei en silt qua grondgedrag weer.

Tabel 3 Kenmerken grondgedrag fijne gronden

| Kenmerken grondgedrag | Klei | Silt |
|-----------------------|---|---|
| Dilatantie | Geen | Dilatant gedrag* |
| Taaigheid | Hoog | Lage taaigheid |
| Plasticiteit | Sterk plastisch | Niet tot weinig plastisch: er kan geen rolletje van worden gemaakt |
| Droge sterkte | Hoog tot zeer hoog | Geen tot gering |
| Gevoel | Glad, plakkerig (indien nat) | Zijdeachtig, knisperig |
| Gedrag in water | Valt niet tot langzaam uit elkaar | Valt snel uit elkaar |
| Gedrag in lucht | Droogt langzaam en krimpt | Droogt snel met weinig krimpscheuren en is gemakkelijk af te veegen |
| Cohesie | Vervormt zonder scheurvorming. Behoudt vorm en vochtgehalte tijdens bewerking | Zakt in elkaar en verliest vocht |

* Dilatant betekent dat het volume vergroot bij schuifvervorming in grotendeels verzadigde toestand.

De beschrijving van de secundaire fractie is veel beperkter dan in NEN 5104. Omdat het zintuiglijk niet mogelijk is om betrouwbaar het aandeel silt in klei te schatten, komen de benaming 'siltig' bij klei of 'kleilig' bij silt niet meer voor. Slechts het relatieve aandeel grind of zand kan aangegeven worden. Ook voor de andere hoofdgrondsoorten zijn de mogelijkheden beperkt.

Het gehalte aan organische stof is volgens NEN-EN-ISO 14688-1 geen secundaire fractie, maar kan in de identificatie wel worden vermeld op basis van de kleur:

- Zwak organisch (bruin).
- Matig organisch (donkergrijs).
- Sterk organisch (zwart).

Deze identificatie is voor Nederlandse klei overigens zeer indicatief, omdat de kleur mede afhankelijk is van de redoxtoestand en het sulfidegehalte.

Andere relevante kenmerken voor fijne grond uit de identificatie zijn:

- Bepaling van de consistentie (zeer slap, slap, stevig, stijf, zeer stijf).
- De aanduiding van het kalkgehalte (kalkloos, zwak kalkhoudend, kalkhoudend, kalkrijk).
- Typen grond (vulkanisch, löss, glaciaal, antropogeen).
- Gelaagdheid en discontinuïteiten.
- Antropogene bijzondere materialen (huisvuil, puin, stenen, wegmetaal, etc.).
- Natuurlijke bijzondere materialen (hout, plantenresten, oer, schelpmetaal, etc.).

Een standaard monsterbeschrijving moet voldoen aan de beschrijfkwaliteit B2 die in norm wordt toegelicht. Dit betekent dat alles (indien waarneembaar) wordt vastgelegd, met uitzondering van geologische herkomst en extra aspecten voor veenclassificatie. De grondbeschrijver moet aantoonbare kennis hebben en op niveau houden.

NEN-EN-ISO 14688-2: Grondslagen voor classificatie [10]

De classificatie van grond vindt plaats aan de hand van speciaal hiervoor bedoelde laboratoriumproeven, zogenaamde indextesten. De resultaten van deze indextesten mogen de resultaten van de identificatie op basis van deel 1 van de norm niet vervangen. Beide resultaten worden daarom naast elkaar gerapporteerd. Op basis van de gemeten waarden bij indextesten worden grondsoorten in klassen ingedeeld:

- Korrelgroottefracties.
- Korrelgrootteverdeling.
- Vorm van de korrelverdelingscurve (uniform, slecht, matig, goed, discontinue).
- Plasticiteit (klei/silt, laag, matig, hoog, zeer hoog).

- Gehalte aan organisch materiaal (zwak, matig, sterk organisch).
- Kalkgehalte (niet-kalkhoudend, zwak kalkhoudend, kalkhoudend, kalkrijk, sterk kalkhoudend)
- Relatieve dichtheid grove grond (zeer los, los, matig dicht, dicht, zeer dicht).
- Ongedraineerde schuifsterkte fijne grond (extreem laag, zeer laag, laag, matig, hoog, zeer hoog, extreem hoog).
- Gevoeligheid (laag, matig, hoog).
- Consistentie-index (zeer slap, slap, stevig, vast, zeer vast).

In de norm staat dat voor speciale doeleinden ook andere parameters kunnen worden gebruikt, bijvoorbeeld mineralogische samenstelling, activiteit, zwellingsindex en *collapse potential*. Er wordt echter niet toegelicht hoe deze kunnen worden bepaald of in klassen worden ingedeeld.

VOTB-handreiking voor hantering NEN-EN-ISO 14688 [12]

NEN-EN-ISO 14688 beschrijft de beschikbare indextesten voor de classificatie van grond, maar schrijft niet voor hoeveel testen van elke type moeten worden gedaan. Dit heeft als nadeel dat iedereen zijn eigen keuzes maakt, waardoor ongewenste kwaliteitsverschillen kunnen ontstaan tussen geotechnische grondonderzoeken bij projecten. Daarnaast is het een risico dat de monsternamemethode onvoldoende is afgestemd op het type indextesten, waardoor de beschikbare kwaliteit en hoeveelheid monstermateriaal onvoldoende is. Daarom heeft de Vereniging Technisch Bodemonderzoek (VOTB) een handreiking geschreven voor een uniforme aanpak.

Voor standaard geotechnisch onderzoek wordt geadviseerd om een boorbeschrijving te doen volgens beschrijfkwaliteit B2. De boor- en monsternamemethode moet afgestemd zijn op de beoogde toepassing, zie tabel 4.

Tabel 4 Monsternamenameklassen en bijbehorende methodes en toepassingen

| Monsternamename-klasse | Monsternamename-methode (meest voorkomende voorbeelden) | Toepassing |
|------------------------|--|---|
| QM1 | Dunwandige <i>piston sampler</i> op cohesief materiaal Gel push sampler | Sterkte Samendrukbaarheid Stijfheid |
| QM2 | Ackerman op cohesief materiaal Dikwandige <i>piston sampler</i> op cohesief materiaal | Laaggrenzen (nauwkeurig) Porositeit Doorlatendheid |
| QM3 | Ackerman, geslagen op cohesieloos materiaal Dunwandige <i>piston sampler</i> op cohesieloos materiaal | Volledige identificatie Classificatie Volumiek gewicht Watergehalte Ongedraineerde schuifsterkte (Torvane test/ pocket penetrometer) |
| QM4 | Gutsboring slappe cohesieve grond Handboring boven grondwaterstand | Identificatie Atterbergse grenzen Organisch stofgehalte Kalkgehalte Korrelverdeling |
| QM5 | Mechanische pulsborings onder grondwaterstand Handboring onder grondwaterstand | Globale identificatie Opeenvolging van lagen |

Het advies is om boringen dieper dan 2 meter mechanisch uit te voeren in verband met de monsterkwaliteit en om arbotechnische redenen.

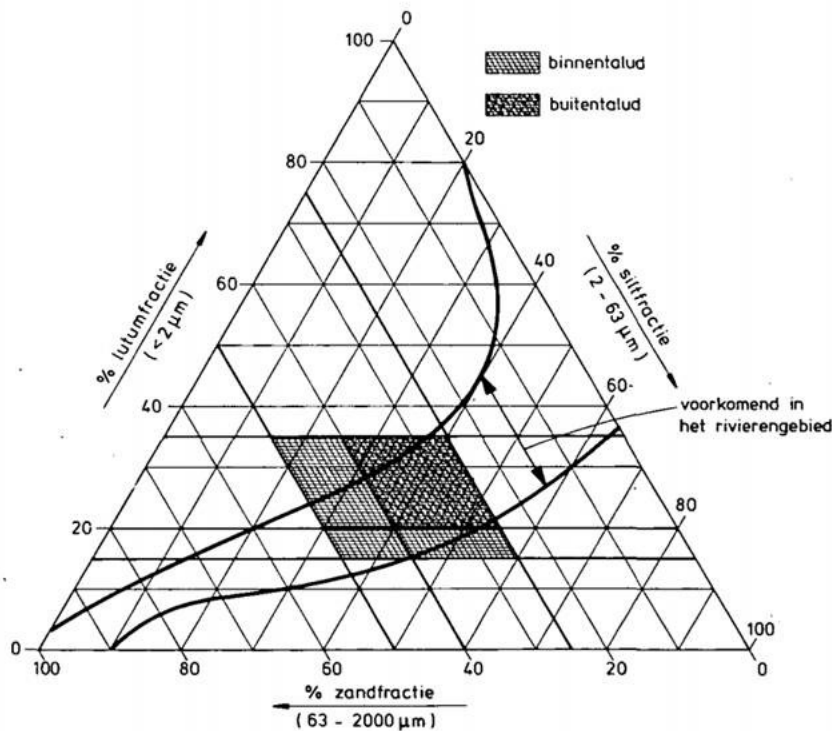
Aanbevolen wordt om, afhankelijk van het doel, indextesten uit te voeren. Het advies is om dit om de 0,5 of 1,0 meter te doen en om per monster een basisset of een uitgebreide set aan indextesten uit te voeren. Voor grove gronden is minimaal monsternamenameklasse QM4 nodig voor indextesten, voor fijne gronden en organisch materiaal is dat minimaal QM3.

3.4 Beschrijving van dijksmateriaal

Grond in dijken wordt net als andere grond aangeduid volgens de definities uit de NEN-normen. Daarnaast worden voor dijken specifieke termen toegepast.

Klei die geschikt is voor dijken, wordt ook wel dijkklei genoemd. Uit oude werkbeschrijvingen is bekend dat al honderden jaren onderscheid wordt gemaakt tussen klei die wel of niet geschikt is. De meest geschikte kleisoorten worden meestal in de dijk toegepast. De grondselectie werd lange tijd gedaan op basis van ervaring door boormeesters en werkopzichters. In de praktijk wordt bij kleinschalige dijkversterkingen lokaal nog steeds zo gewerkt, zo blijkt uit [3]. Uit laboratoriumproeven op lang geleden aangebracht dijksmateriaal blijkt echter dat deze grond van wisselende kwaliteit is. Blijkbaar leidde de ambachtelijke manier van kleiselectie niet in alle gevallen tot hetzelfde resultaat, of was er geen drijfveer of mogelijkheid om te investeren in goed dijksmateriaal.

In de loop van de twintigste eeuw is het systematisch keuren van grond geleidelijk in zwang geraakt. Daardoor is de kwaliteit van dijkklei constanter geworden. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 10. Deze figuur uit de jaren 80 laat zien welke grondsamenstellingen in het rivierengebied voorkomen en welke geschikt zijn voor dijkbouw. Daaruit volgde dat de destijds in dijken toegepaste klei binnen bepaalde bandbreedtes qua lutum- en zandgehalte viel.



Figuur 10 Overzicht van in het rivierengebied voorkomende gronden en de voorkeursamenstelling van klei die in de jaren 80 in rivierdijken werd toegepast [13].

Minimumeisen en erosiecategorieën dijkklei

In het "Technisch Rapport Klei voor Dijken" [14] en de RAW [15] zijn in de jaren 90 minimeisen gesteld aan klei voor dijken die nog altijd worden gehanteerd. Bij het opstellen van deze eisen is gesteld dat er geen onderscheid gemaakt moet worden tussen klei voor kleibekleding en voor toepassing in de kern of berm en de verschillende soorten belasting die daar kunnen optreden. Deze eisen gelden generiek voor dijkklei:

- Grondsoort is klei conform NEN 5104.
- Organisch stofgehalte (gewichtverlies bij waterstofperoxidebehandeling) lager dan 5%.
- Zoutgehalte (NaCl) lager dan 4% per liter bodemvocht.

- Kalkgehalte (HCl-massaverlies) lager dan 25%.
- Geen extreme verkleuringen bij ontgraven en drogen (helder rood, helder geel, helder blauw of veel zwarte plekken).
- Geen afwijkende sterke geur (rotte eieren, olie- of kolenachtig).
- Geen significante bijmengingen van puin, grind en dergelijke.

Klei die na ongeveer 1990 in dijken is aangebracht, voldoet vaak aan deze eisen en heeft dus een bepaalde minimumkwaliteit.

Deze dijkklei is vervolgens in drie (erosie)categorieën ingedeeld voor het beoordelen van erosiegevoeligheid, aanleg en beheer, afhankelijk van de Atterbergse grenzen en het zandgehalte:

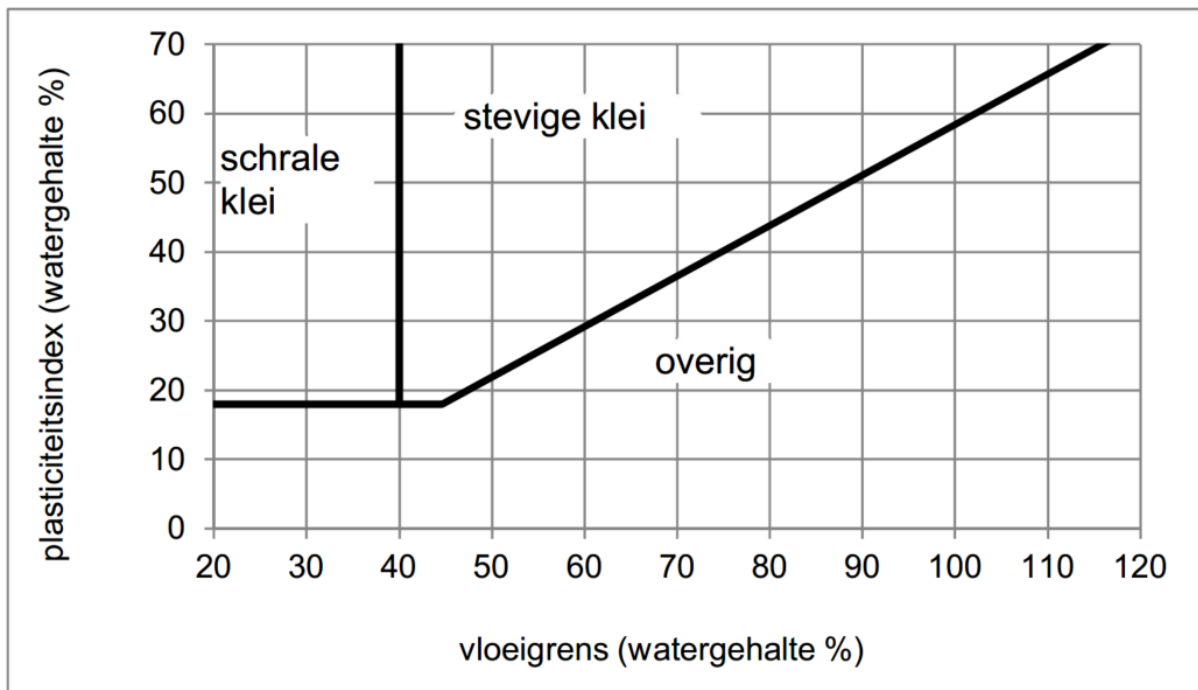
1. Erosiebestendige klei ($w_l > 45\%$, $I_p > A$ -lijn, zandgehalte $< 40\%$).
2. Matig erosiebestendige klei ($w_l < 45\%$, $I_p > 18\%$, zandgehalte $< 40\%$).
3. Weinig erosiebestendige klei (overige dijkklei).

Het langdurig hanteren van deze indeling heeft ertoe geleid dat partijen klei in de praktijk worden aangeduid met de erosiecategorie waarbinnen ze vallen.

Uit aanvullende proeven en praktijkervaring is gebleken dat bij buitentaluds minder strenge eisen hoeven te worden gesteld aan de erosiebestendigheid. Dit heeft geleid tot diverse nieuwe indelingen in het plasticiteitsdiagram [8] [16]. In het kader van het wettelijk instrumentarium voor de beoordeling (WBI 2017) [17] is uiteindelijk onderstaande nieuwe indeling voorgesteld voor de erosiebestendigheid:

- I. Stevige klei ($w_l > 40\%$, $I_p > A$ -lijn en 18% , zandgehalte $< 40\%$).
- II. Schrale klei ($w_l < 40\%$, $I_p > 18\%$).
- III. Niet geschikte grond (overig).

De nieuwe indeling wordt sinds een paar jaar ook gebruikt bij de naamgeving van dijksmateriaal. Om verwarring met de RAW-categorie-indeling te voorkomen worden Romeinse cijfers gebruikt.



Figuur 11 Indeling kleisoorten conform WBI 2017 [17]

Met de indeling in erosiecategorieën kan eenvoudig een voor erosiebestendigheid relevant onderscheid worden gemaakt tussen kleisoorten. Een complicatie is echter dat veel Nederlands kleisoorten rondom de A-lijn of het grens-zandgehalte 40% zitten. Een ander nadeel is dat grond in Nederland vaak relatief veel plantenresten bevat in

vergelijking met de gronden waarop de A-lijn grotendeels is gebaseerd. Daarbij komt dat er geen eenduidige, aanvaardbare werkwijze is om met variaties in de samenstelling van monsters om te gaan. Daardoor is het onderscheid tussen de erosie categorieën soms minimaal en niet zo veelzeggend.

Overige naamgeving dijkenklei

De naamgeving van klei in dijken wordt verder regelmatig gerelateerd aan het lutumgehalte [11]:

- Lutumgehalte < 35%: lichte, magere of schrale klei.
- Lutumgehalte > 35%: zware of vette klei.

De hiervoor genoemde benamingen zijn afhankelijk van eisen en grenswaarden. Daarnaast werden of worden in Nederlandse dijken grondsoorten toegepast die hun naam danken aan hun herkomst. Hierna volgt een korte opsomming:

| | |
|-----------|---|
| Keileem | Een mengsel van grind, zand, silt en klei dat in het noorden van Nederland is afgezet tijdens de voorlaatste ijstijd. Het is veel in dijken toegepast tijdens de Zuiderzeewerken en wordt in het Noordoosten van Nederland nog steeds als dijksmateriaal toegepast in regionale waterkeringen. |
| Löss | Silt uit Zuid-Limburg. De term löss wordt vanwege de algemene inzetbaarheid van de methodiek niet in de classificatie gebruikt, maar kan de karakterisering in beschrijvingen worden toegevoegd. (Verspoelde) löss komt in Zuid-Limburg veel voor, kan goed worden onderscheiden en vertoont een verschillend civieltechnisch gedrag vertonen dan silt in het algemeen. |
| Wier | Dit is voornamelijk uit zeegras bestaand organisch materiaal, dat tussen de 14 ^e en 18 ^e eeuw is toegepast in dijken rondom de voormalige Zuiderzee. |
| Flugsand | Uit Duitsland geïmporteerd vulkanisch materiaal met een hoge porositeit en een licht gewicht. Het is in de jaren 90 toegepast als aanvulmateriaal bij rivierdijken in het benedenrivierengebied. |
| Mijnsteen | Restproduct uit de mijnbouw, dat voornamelijk is opgebouwd uit kleisteenfragmenten. Het is in het verleden toegepast als perskade of teenconstructie bij buitenwaartse dijkversterkingen in den natte. Meer recentelijk is het ook gebruikt als aanvulling van kernmateriaal in zeedijken. |

3.5 Bepalen van eigenschappen dijksmateriaal

Bij de bepaling van de geschiktheid van gebiedseigen grond bij dijkversterkingen wordt meestal van grof naar fijn gewerkt. Het begint met een globale geschiktheidsbepaling op basis van gebiedskennis. Vervolgens wordt naar de grond zelf gekeken en deze geschiktheid visueel en met proeven steeds preciezer bepaald. De volgende vijf niveaus van diepgang worden onderscheiden:

1. Bureaustudie op basis van gebiedskennis.
2. Visuele beoordeling grondmonsters.
3. Classificatieproeven.
4. Standaardproeven voor dijksmateriaal.
5. Maatwerk onderzoek/speciale proeven.

De eerste twee niveaus (bureaustudie en visuele beoordeling) worden uitgevoerd om algemene geschiktheid en om meerdere verschillende gronddepots tegen elkaar af te wegen. De benodigde tijd en kosten zijn beperkt, omdat er geen proeven worden uitgevoerd. Niveaus drie en vier (classificatieproeven voor NEN-ISO beoordeling en standaardproeven voor dijksmateriaal) worden gedaan om voor kansrijke partijen grond te beoordelen in hoeverre de grondparameters zich verhouden tot de grenswaarden. Het is economisch voordelig om eerst een voor de aangetroffen variatie voldoende aantal classificatieproeven uit te voeren en daarna pas standaardproeven te doen voor dijksmateriaal op mogelijk geschikte deelpartijen. Het laatste niveau (maatwerk onderzoek) wordt alleen doorlopen bij bijzondere ontwerpomstandigheden, als onderbouwd van de standardeisen wordt afgeweken, of als grond wordt bewerkt of gemengd met een ander materiaal.

In principe kunnen alle niveaus van diepgang in elke projectfase worden doorlopen. Dit is afhankelijk van het instapmoment van grondaanbieders in het proces van grondgestuurd ontwerpen. In de praktijk zal de diepgang van het onderzoek concreter worden naarmate het dijkversterkingsontwerp gedetailleerder is uitgewerkt. Daarbij moet natuurlijk wel voortdurend rekening worden gehouden met mogelijk minder geschikt zijn van voorhanden grond.

Voorbeelden bepaling eigenschappen van grof naar fijn

*In West-Friesland zijn waterbergingen aangelegd door Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. Een deel van de ontgraven grond is hergebruikt bij de versterking van **Zuiderdijk van Drechterland**. In de waterbergingsgebieden zijn eerst tientallen handboringen uitgevoerd. Op basis van de boorbeschrijvingen is bepaald welke grond mogelijk kansrijk was om als dijkklei te worden hergebruikt. Pas daarna zijn gericht laboratoriumproeven uitgevoerd om de erosiebestendigheid van de klei te bepalen [2].*

*Voor **Dijkversterking Fluviaal** bij Tiel zijn, door waterschap Rivierenland, strangen gegraven in de uiterwaarden. Deze grond is hergebruikt in de dijkversterking. Aanvankelijk waren in de uiterwaarden alleen milieuboringen uitgevoerd. De boorbeschrijvingen van de milieuboringen gaven echter al een eerste indruk over de RAW-erosie categorieën van de aangetroffen kleilagen [2].*

3.5.1 Bureaustudie op basis van gebiedskennis

Op basis van openbare bronnen en gegevens van oude projecten kan een eerste inschatting worden gemaakt van de geschiktheid van grond die uit een natuurlijk afgezette laag wordt gewonnen. Hierna wordt een aantal veelgebruikte bronnen toegelicht.

Dinoloket Ondergrondgegevens

Dit loket is te raadplegen via www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens. Hierin zijn de resultaten van veel sonderingen en boringen in Nederland te vinden. Deze worden aangevuld via de Basis Registratie Ondergrond (BRO).

Dinoloket Ondergrondmodellen en Ondergrondgegevens

Dit loket is te raadplegen via www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen. Het betreft geïnterpreteerde informatie over de ondergrond, maar ook de originele boringen en sonderingen. Hier zijn de volgende kaarten en modellen te vinden die informatie geven over de geschiktheid van grond voor toepassing in dijkversterkingen:

- Bodemkaart van Nederland.
Deze geeft informatie over de bovenste 1,2 meter van de ondergrond. Hiermee kan de herkomst van grondsoorten worden herleid en een globale indicatie over de samenstelling van de grond (kalkgehalte, textuur, lutumgehalte). De bodemkundige naamgeving wijkt af van de geotechnische beschrijving, maar de karakteristieken van de grond kunnen via de legenda worden afgeleid [18].
- GeoTOP.
Het model GeoTOP geeft een driedimensionaal beeld van de ondergrond van grote delen van Nederland tot een diepte van maximaal 50 meter onder NAP. In GeoTOP wordt de ondergrond onderverdeeld in miljoenen voxels (cellen) van 100 bij 100 meter in de horizontale richtingen en 50 centimeter verticaal. Aan elke voxel worden eigenschappen gekoppeld, zoals lithostratigrafische eenheid en grondsoort (lithoklasse), die kenmerkend zijn voor diverse fysische en chemische parameters [19].
- Geomorfologische kaart van Nederland.
Deze geeft informatie over de reliëfvormen van het aardoppervlak, ontstaanswijze en ouderdom. Daarnaast wordt aanvullende informatie gegeven over afwijkende geologische afzettingen in de bovengrond en eventuele bijzonderheden in het reliëf [20].

Archieven met oud grondonderzoek van grondonderzoeksbureaus

Veel grondonderzoeksbureaus hebben een eigen archief met grondonderzoeksresultaten, die aanvullende informatie geeft ten opzichte van het Dinoloket Ondergrondgegevens, bijvoorbeeld Gaia Insight van Fugro.

Digitaal basisbestand paleogeografie van Rijn-Maasdelta

Dit zijn openbaar beschikbare kaarten van de Universiteit Utrecht met de ligging en ouderdom van rivierafzettingen [21]. Deze zijn bruikbaar om bij dijkversterkingen in het rivierengebied te kunnen inschatten of er lokaal sprake is van een afwijkende bodemopbouw.

Kaart van winbare oppervlaktedelfstoffen

Op www.delfstoffenonline.nl is systematisch geordende informatie te vinden over oppervlaktedelfstoffen in Nederland. Het is gebaseerd op "Clay resources in the Netherlands" [22]. De website bevat onder meer een viewer die de totale hoeveelheden aanwezige klei weergeeft en informatie over de winbaarheid en kwaliteit. De kans op ongewenste bijmengingen in de klei wordt aangegeven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen schelpen, veenbrokjes en grove fracties. Als er sprake is van löss, keileem of zeeklei, dan wordt dit specifiek vermeld.

Kaart van Nederland met lutumgehalte in klei en leem

Relevante kaarten van TNO [23] en Rijkswaterstaat [24] zijn in bijlage 2 opgenomen bij de behandeling van het lutumgehalte. Hierin is globaal per gebied aangegeven in welke range het lutumgehalte van klei en leem ligt.

Kaart van Nederland met organisch stofgehalte in bodemlagen

Kaarten en grafieken met kengetallen voor het organisch stofgehalte in de bovenste circa 0.3 meter van de bodem [25] staan in bijlage 2.

Gearchiveerd grondonderzoek van een (dijkversterkings)project

In het verleden is vaak projectspecifiek onderzoek uitgevoerd waaruit relevante gegevens over de geschiktheid van klei voor dijkversterkingen te herleiden is. Deze onderzoeken zijn vaak met een ander doel uitgevoerd, maar geven direct of indirect wel informatie over geotechnische grondparameters. Voorbeelden zijn:

- Grondonderzoek voor eerdere dijkversterkingen.
- Grondonderzoek voor meekoppelprojecten.
- Oude kleikeuringen (bijvoorbeeld voor de keramische industrie).
- Archeologisch onderzoek.
- Milieukundig bodemonderzoek.
- Geoscans [7].

3.5.2 Visuele beoordeling grondmonsters

Classificatie van grond volgens NEN 5104 en volgens NEN-EN-ISO 14688-1 zijn beide een methode om grond visueel te beoordelen. Ze geven op een aantal manieren informatie over de geschiktheid van de grond voor toepassing in dijken.

Beschrijving dijksmateriaal volgens NEN 5104

De beschrijving van dijksmateriaal op basis van NEN 5104 geeft informatie over de geschiktheid van klei voor toepassing in dijken. Aan de hand van die eisen (zie paragraaf 3.4) kan namelijk globaal worden bepaald in welke erosiecategorie de klei valt.

De hoofdnaam en toevoeging van de grondsoort geeft globaal aan binnen welke marges de percentages zand, silt, lutum vallen. Zandig of uiterst siltige klei heeft bijvoorbeeld globaal een lutumgehalte lager dan 25%. Dit is dus relatief schrale klei. Klei met de toevoeging zwak siltig (lutumgehalte > 50%) of matig siltig (lutumgehalte tussen 35% en 50%) is juist relatief vette klei. Zandige klei heeft globaal een zandgehalte hoger dan 50%. Dit is dus klei met een beperkte erosiebestendigheid.

De toevoeging 'humeus' bij klei geeft globaal aan binnen welke marges het organisch stofgehalte valt:

- Zwak humeuze klei heeft een organisch stofgehalte lager dan 2,5 % en is geschikt voor toepassing in dijken.
- Matig humeuze klei heeft een organisch stofgehalte tussen 2,5 en 8%. De toepasbaarheid hiervan in dijken is toepasbaar, maar vergt enige specificaties voor het ontwerp [26].
- Sterk humeuze klei heeft een organisch stofgehalte hoger dan 8% en is meestal ongeschikt voor toepassing in dijken. Dit komt doordat het lastig te verwerken is, een beperkte stijfheid en sterkte heeft en vaak erg nat is waardoor het te veel krimpt.

Overige relevante toevoegingen bij NEN 5104-classificatie van klei zijn:

- Kalkgehalte (HCl-massaverlies), aanwezigheid van schelpen: dit zegt globaal iets over het kalkgehalte van klei. Het HCl-massaverlies is echter ook afhankelijk van andere bestanddelen, zoals ijzersulfide en organische stof.
- Plantenresten, riet, hout: dit duidt doorgaans op een te hoog organisch stofgehalte omdat in Nederlandse kleigrond de meer of minder vergane plantenresten meer dan 90% van de organische stof vertegenwoordigen.
- Geur en kleur: als dit afwijkt, dan kan er sprake zijn van verontreinigde grond. Het kan ook betekenen dat de klei veel sulfide bevat (donkere, zwarte, tinten) wat bij blootstelling aan de open lucht tot extreem zure omstandigheden leidt en de structuurvorming negatief beïnvloedt.
- Puin, hout, plastic: dit zijn aanwijzingen dat het om antropogeen materiaal (niet-natuurlijk afgezette grond) gaat.
- Zandlagen, zandlenzen: dit kan het gedrag van klei nadelig beïnvloeden (lagere erosiebestendigheid, ophoping van water). Het te grof afgraven van een kleidepot op een zandondergrond kan hiervan de oorzaak zijn.

De grofheidsaanduiding van zand geeft een globale indruk of zand gevoelig is voor uitspoeling en verweking (fijn zand) of juist goed draineert (grof zand). Alle grond die in NEN 5104 de hoofdbenaming zand heeft, valt in de RAW-categorie 'ophoogzand'. Uit de grofheidsaanduiding kan niet worden herleid of sprake is van de RAW-categorie 'zand voor zandbed' of 'drainagezand'.

Een grote tekortkoming van visuele beoordeling conform NEN 5104, is dat het geen informatie geeft over de Atterbergse grenzen van klei. Deze kunnen weliswaar globaal worden gerelateerd aan het lutumgehalte, maar zijn daarnaast ook afhankelijk van het type mineralen dat in de grond voorkomt. Een keileemmonster en een kleimonster kunnen bijvoorbeeld hetzelfde lutumgehalte hebben. Maar een kleimonster heeft meestal hogere Atterbergse grenzen, doordat een groot deel van de fijne deeltjes uit kleimineralen bestaat (plaatvormig) in plaats van uit korrels van voornamelijk kwarts, veldspaat en andere gesteentevormende mineralen.

Identificatie dijkmateriaal volgens NEN-EN-ISO 14688-1

De identificatie volgens NEN-EN-ISO 14688-1 geeft informatie over de geschiktheid van klei voor toepassing in dijken, omdat aan de hand van de eisen (zie paragraaf 3.4) globaal kan worden bepaald in welke erosie categorie de klei valt.

De benaming van grond alleen geeft beperkte informatie over de samenstelling. Klei en silt hebben een zandgehalte lager dan 50% en bevatten minder dan 30% organisch materiaal. Er is dus meer informatie nodig om de toepassingsmogelijkheden te kunnen inschatten.

De identificatie van het organisch stofgehalte is gebaseerd op de kleuraanduiding. In NEN-EN-ISO 14688-1 worden drie categorieën onderscheiden: zwak organisch (bruin), matig organisch (donkergrijs), sterk organisch (zwart). In [27] is de kleur gerelateerd aan het percentage organisch materiaal:

Tabel 5 Indicatieve relatie tussen kleikleur en organisch stofgehalte [27]

| Kleuraanduiding | Benaming in CUR-rapport | Organisch stofgehalte |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Bruin tot grijs | Licht tot matig humeus | < 4% |
| Donkerbruin tot donkergrijs | Zeer humeus | 4 tot 8% |
| Donkergrijs tot zwart | Humusrijk | 8 tot 15% |
| Zwart | Venig | 15 tot 30% |
| Lichtbruin tot zwart | Veen | >30% |

Bovenstaande relatie is indicatief, omdat de kleuren mede bepaald worden door de redoxtoestand van de grond en het sulfidegehalte. De standaardeis voor het organisch stofgehalte van dijkklei is maximaal 5% [15]. Waar dat relevant is, kan deze worden opgerekt naar circa 8%, zie bijlage 2. Grijs klei (zwak organisch conform NEN-EN-ISO 14688-1) lijkt dus een redelijke kans te hebben om hieraan te voldoen, maar zwarte klei (sterk organisch conform NEN-EN-ISO 14688-1) lijkt te veel organisch materiaal te bevatten

De aanduiding van het kalkgehalte uit NEN-EN-ISO 14688-1 kan via NEN 5104 een indicatie voor een deel van de bepaling van gewichtsverlies bij HCl-behandeling van grond geven, namelijk de herkenbare schelpfragmenten. De mate van bruisen bij de bruistest geeft geen relevante informatie omdat de gehalten die daarbij genoemd worden, te laag zijn in vergelijking met de 25% die genoemd wordt bij het beoordelen van klei.

Tabel 6 Relatie tussen aanduiding kalkgehalte NEN-EN-ISO 14688-1 en kalkpercentage [9]

| Aanduiding kalkgehalte | Resultaat bruistest | Kalkgehalte |
|------------------------|--|-------------|
| Kalkloos | Geen reactie in bruistest | < 0,5 % |
| Zwak kalkhoudend | Zwakke reactie in bruistest | < 0,5 à 2 % |
| Kalkhoudend | Waarneembare reactie in bruistest | < 0,5 à 2 % |
| Kalkrijk | Sterke en aanhoudende reactie in bruistest | > 2 % |

Het onderscheid tussen klei en silt geeft een indicatie van de erosie categorie. De grens tussen beide grondsoorten ligt namelijk bij de A-lijn in het plasticiteitsdiagram. Dit betekent dat de naamgeving 'klei' duidt op erosie categorie 1 en 2 klei, dan wel stevige of schrale klei. De naamgeving 'silt' duidt op erosie categorie 3 klei, dan wel 'niet geschikte grond'.

In de NEN-EN-ISO 14688-1 zijn indicaties voor de consistentie-index opgenomen (zie tabel 7). Het gaat om indicaties zonder dat de Atterbergse grenzen en het watergehalte worden bepaald.

Tabel 7 Indicatieve bepaling consistentie-index op basis van NEN-EN-ISO 14688-1-identificatie [28]

| Consistentie | Consistentie-index |
|--------------|------------------------------|
| Zeer slap | $I_c < 0,05$ |
| Slap | $I_c = 0,05 \text{ à } 0,25$ |
| Stevig | $I_c = 0,25 \text{ à } 0,75$ |
| Stijf | $I_c = 0,75 \text{ à } 1,00$ |
| Zeer stijf | $I_c > 1,00$ |

3.5.3 Classificatieproeven

Het volgende niveau voor het bepalen van de eigenschappen van het dijksmateriaal is het uitvoeren van classificatieproeven. Met classificatieproeven volgens NEN-EN-ISO 14688-2 wordt meer inzicht verkregen in de toepasbaarheid van grond in dijken dan met identificatie volgens NEN-EN-ISO 14688-1.

Bij de classificatie van grond conform NEN-EN-ISO 14688-2 wordt op basis van indextesten benoemd in welke klassen deze valt. Op basis hiervan worden zaken als het gehalte aan organische stof en het kalkgehalte beschreven. De klassen zeggen globaal iets over de toepasbaarheid van de grond in dijken. Het is echter effectiever om direct de resultaten van de indextesten te gebruiken, omdat deze de precieze waarden aangeven. Daarom zijn de tabellen met omschrijvingen per klasse in dit rapport niet weergegeven. Deze indextesten geven in sommige gevallen echter een minder nauwkeurig inzicht dan de laboratoriumproeven die voor dijkenklei zijn voorgeschreven, zie tabel 8.

Tabel 8 Meerwaarde van beschrijving en indextesten conform NEN-EN-ISO 14688-2 voor vaststelling van geschiktheid klei voor dijken

| Parameter | Meerwaarde van beschrijving conform NEN-EN-ISO 14688-1 | Meerwaarde van indextest conform NEN-EN-ISO 14688-2 |
|--|--|---|
| Korrelgrootteverdeling | Objectieve vaststelling grondsoort | Globale bepaling RAW-erosie categorie fijne grond (samen met plasticiteit)* Globale bepaling lutumgehalte * |
| Vorm van korrelverdelingscurve | Globale beoordeling verdichtbaarheid, wrijvingshoek en suffosie (erosie van fijne deeltjes uit sterk gegradeerd materiaal) Indicatie van de vorming van bodemstructuur in onverzadigde zone | Beoordeling verdichtbaarheid, wrijvingshoek en suffosie Indicatie van de vorming van bodemstructuur in onverzadigde zone |
| Plasticiteit | Onderscheid tussen categorie 1 en 3 klei/ stevige klei en niet erosiebestendige klei Globaal onderscheid tussen categorie 2/ schrale klei en overige klei | Globale bepaling RAW-erosie categorie fijne grond (samen met korrelgrootteverdeling)* |
| Gehalte aan organische stof | Globale beoordeling organisch stofgehalte | Exacte beoordeling organisch stofgehalte |
| Kalkgehalte | Geen | Exacte beoordeling kalkgehalte |
| Relatieve dichtheid grove grond | Globale beoordeling uitvoeringseis | Globale beoordeling RAW-uitvoeringseis* |
| Ongedraineerde schuifsterkte fijne grond | Globale indicatie schuifsterkte | Globale indicatie schuifsterkte* |
| Gevoeligheid | Globale beoordeling reststerkte na verkneding of deels bezwijken dijk | Beoordeling reststerkte na verkneding of deels bezwijken dijk |
| Consistentie-index | Globale beoordeling uitvoeringsmogelijkheden Indicatie van de vorming van bodemstructuur in onverzadigde zone | Exacte beoordeling RAW-uitvoeringseis Indicatie van de vorming van bodemstructuur in onverzadigde zone |

* In de volgende paragraaf wordt toegelicht waarom indextesten in sommige gevallen geschikt zijn voor een exacte beoordeling van de geschiktheid van klei en in andere gevallen slechts een globale beoordeling geven.

In de RAW staan proeven beschreven om het type zand te bepalen (ophoogzand, zand voor zandbed of drainagezand), zie Tabel 9. Daarvoor moet een korrelverdeling worden uitgevoerd. Ook moet het gloeiverlies worden bepaald, dit lijkt op de bepaling van het organisch stofgehalte [29].

Tabel 9 RAW-zandcategorien

| Categorie | [% van de minerale delen (<2 mm)] | | | | Gloeiverlies [%] |
|--|-----------------------------------|---------|---------|----------|------------------|
| | < 2 µm | < 20 µm | < 63 µm | > 250 µm | |
| Draineerzand | - | - | ≤ 5 | ≥ 50 | ≤ 3 |
| Zand in zandbed (tot 1 m onder een wegdek) | - | ≤ 3* | ≤ 15 | - | ≤ 3 |
| Zand in aanvulling op ophoging (vanaf 1 m onder een wegdek) | ≤ 8 | - | ≤ 50 | - | - |

*Als gehalte <63 µm 10 tot 15%

3.5.4 Standaardproeven voor dijkmateriaal

Een standaard RAW-kleikuring bestaat uit de volgende proeven:

- Bepaling Atterbergse grenzen, 3-puntsmethode (RAW-proef 14: Casagrandeproef en uitrolproef).
- Bepaling zandgehalte, ofwel massafractie van deeltjes > 63 µm (RAW-proef 2).
- Bepaling organisch stofgehalte (RAW-proef 36).
- Bepaling zoutgehalte (NaCl) in bodemvocht.
- Bepaling HCl-massaverlies (RAW-proef 37).
- Optioneel: bepaling lutumgehalte, ofwel massafractie van deeltjes < 2 µm (RAW-proef 29).
- Nagaan of er afwijkingen voorkomen die schadelijk kunnen zijn voor constructieve toepassing, zoals:
 - visueel waarneembare vreemde bestanddelen, zoals steenmaterialen, wortels en planten;
 - extreme verkleuringen bij ontgraven en drogen (helder rood, helder geel, helder blauw of veel zwarte plekken);
 - een afwijkende sterke geur (rotte eieren, olie- of kolenachtig);
 - inhomogeniteiten, zoals concentraties zand of zandrijk materiaal.
- Bepaling watergehalte (voor consistentie-index) bij verwerken (NEN 5112).
- Bepaling van éénpuntsproctordichtheid direct na aanleg bij aanwezig vochtgehalte (RAW-proef 9).

Tabel 10 Voorbeeld van resultaat van RAW-keuring op 5 dijenkleimonsters

| Resultaten Parameter/Verrichting | Monster | | | | | Eisen | | | Eenheid | Methode van onderzoek | |
|--|---------|------|------|------|------|-------|---------|-----|---------|-----------------------|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | | | |
| Watergehalte (A) | | 21 | 20 | 16 | 21 | 20 | -- | | | %(m/m) | NEN 5112 |
| Gehalte > 63µm | Q | 14,1 | 26,7 | 53,1 | 34,6 | 34,4 | <40 | <40 | -- | %(m/m) | RAW proef 2 |
| Gehalte < 2µm | Q | 15,0 | 15,3 | 14,0 | 22,5 | 18,5 | -- | | | %(m/m) | RAW proef 29 |
| Gehalte organische stof | Q | 4,1 | 2,7 | 2,2 | 2,8 | 2,2 | <5 | | | %(m/m) | RAW proef 36 |
| Massaverlies bij HCl-behandeling | Q | 12,6 | 12,8 | 8,9 | 12,4 | 11,7 | <25 | | | %(m/m) | RAW proef 37 |
| Vloeigrens (W _l) | Q | 44 | 33 | 25 | 34 | 30 | <45 | >45 | -- | %(m/m) | RAW proef 14 |
| Uitrolgrens (W _p) | Q | 21 | 16 | 13 | 17 | 14 | -- | | | %(m/m) | RAW proef 14 |
| Plasticiteitsindex (I _p) | Q | 23 | 16 | 12 | 16 | 16 | >A-lijn | <18 | -- | -- | RAW proef 14 |
| A-lijn | | 17 | 9 | 4 | 10 | 7 | -- | | | -- | berekend als 0,73*(W _l -20) |
| Zoutgehalte bodemvocht | | 0,09 | 0,13 | 0,13 | 0,12 | 0,15 | <4 | | | NaCl g/l | ¹⁾ |
| Maximum Watergehalte (W _{max}) | | 27 | 20 | 16 | 21 | 18 | -- | | | %(m/m) | berekend als W _p + 0,25 I _p |

| Resultaten | | Monster | | | | | Eisen | | | Eenheid | Methode van onderzoek |
|-------------------------------|--|---------|------|------|------|------|--|----|----|---------|--------------------------------------|
| Parameter/Verrichting | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | | |
| Consistentie-index (I_c) | | 1,00 | 0,75 | 0,78 | 0,78 | 0,60 | $I_c > 0,75$ ²⁾ $I_c > 0,60$ ³⁾ | | -- | -- | berekend als $(W_i - A)/(W_i - W_p)$ |
| Vloeibaarheidsindex (I_f) | | - | 0,25 | 0,22 | 0,22 | 0,40 | | -- | | -- | berekend als $1 - I_c$ |
| Voldoet aan erosie categorie | | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | | |

| OPMERKINGEN |
|--|
| De met 'Q' gemerkte verrichtingen zijn geaccrediteerd door Raad van Accreditatie. |
| ¹⁾ Uitgevoerd door Alcontrol Laboratories B.V. te Hoogvliet |
| ²⁾ Geldt voor deklaag |
| ³⁾ Geldt voor kern |
| * Klei voldoet aan erosie categorie zoals aangegeven. De consistentie-index voldoet niet aan de verwerkingseis. |
| Om aan de verwerkingseis te voldoen zal de klei in moeten drogen om het watergehalte lager te krijgen dan de W_{max} . |
| In § 22.06.06 en § 22.06.07 van de Standaard RAW Bepalingen is sprake van klei. Onder klei wordt volgens de classificatienorm NEN 5401 verstaan materiaal met een lutumgehalte van tenminste 8%. Alhoewel in de Standaard RAW Bepalingen niet expliciet vermeld, moeten dus alle kleicategorieën aan deze eis voldoen. |

Tabel 11 Voorbeeld resultaat van RAW-verdichtingsonderzoek op dijkklei

| Resultaten | | | | | | | | |
|--|-------------|------|------|------|------|------|-------------------|-----------------------|
| Parameter | Proefnummer | | | | | | Eenheid | Methode van onderzoek |
| | 019 | 020 | 021 | 022 | 023 | 024 | | |
| Drogedichtheid in-situ | 1565 | 1585 | 1699 | 1542 | 1559 | 1656 | Kg/m ³ | RAW proef 6 Q |
| Watergehalte in-situ | 25.0 | 23.3 | 19.6 | 25.3 | 28.7 | 19.2 | % (m/m) | RAW proef 6 Q |
| Proctordichtheid bij aanwezig watergehalte | 1581 | 1636 | 1697 | 1538 | 1538 | 1692 | Kg/m ³ | RAW proef 6 Q |
| Verdichtingsgraad | 99 | 97 | 100 | 100 | 101 | 98 | % | RAW proef 3 |
| Opmerkingen | | | | | | | | |
| De met 'Q' gemerkte verrichtingen zijn erkend door Raad van Accreditatie. | | | | | | | | |
| In afwijking van proef 9 (normale Proctorproef) is het monster verdicht bij aanwezig watergehalte. | | | | | | | | |

De RAW-kleikeuring schrijft deels andere proeven voor dan NEN-EN-ISO 14688-2. De proeven voor de bepaling van het organisch stof- en kalkgehalte zijn identiek. Voor de bepaling van het zandgehalte en het lutumgehalte worden in NEN-EN-ISO 14688-2 meerdere opties genoemd. Sommige daarvan, zoals bepaling uit een zeefcurve, zijn minder nauwkeurig dan de RAW-proeven. De bepaling van de vloeigrens verschilt ook. In NEN-EN-ISO 14688-2 wordt hiervoor de Valconusproef voorgeschreven, omdat deze eenduidiger is dan de Casagrandeproef uit de RAW. Deze leidt echter gemiddeld tot iets andere resultaten en kan dus niet voor de RAW-keuring worden ingezet, onder andere omdat de A-lijn met de Casagrandeproef is vastgelegd.

Daarnaast stelt de RAW eisen aan de minimale representatieve steekproefgrootte. Voor een representatief materiaalkundig onderzoek is per 1.000 m² minimaal één boring nodig bij een laagdikte van minder dan 5 meter en is per 5.000 m² minimaal één boring nodig bij een laagdikte van meer dan 5 meter. Verder moet elke 0,5 meter en bij elke laagscheiding een monster worden genomen. In de praktijk is daarnaast een en ander afhankelijk van de aangetroffen variatie.

3.5.5 Maatwerkonderzoek/speciale proeven

De standaard RAW-kleikeuring volstaat bij een traditioneel dijkversterkingsontwerp. Toepassing van afwijkende grond, bij bijzondere belastingsituaties of bij de wens tot een scherp ontwerp, vereist meer inzicht in het grondgedrag. Dit kan met speciale proeven. In Tabel 12 staat een opsomming van speciale proeven om de

geschiktheid van klei voor toepassing in dijkversterkingen te bepalen. Per proef is aangegeven wat het doel ervan is, hoe deze moet worden uitgevoerd en hoe gangbaar de proef is (voor de geschiktheidsbeoordeling en/of voor beoordeling van de bestaande dijk). De proeven zijn globaal gebundeld per constructieve gedragseigenschap, maar veel proeven geven inzicht in meerdere gedragseigenschappen. Voor achtergronden van deze proeven, inclusief gedetailleerde proefbeschrijvingen, wordt verwezen naar de vermelde bronnen, of kunnen experts worden geraadpleegd. Voor sommige proeven wordt aangegeven dat ze zijn toegepast zijn bij proefprojecten bij dijken. Voorbeelden van proefprojecten waarbij veel nieuwe proeven zijn uitgetoetst, zijn het onderzoek van de kleibekleding in de Oesterdam [30], proefophogingen met euroklei [31] en klei uit baggerspecie [32], Brede Groene Dijk [33] en het onderzoek naar klei-erosie onder golfbelasting [34]. Hoofdstuk 4 gaat verder in op de parameters die in deze proeven worden bepaald.

Tabel 12 Overzicht van speciale geschiktheidsproeven op klei (niet volledig)

| Proef | Doel | Bron | Gangbaarheid algemeen | Gangbaarheid bij Nederlandse dijken |
|---|---|----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Structuurvorming</i> | | | | |
| X-stralendiffractie (XRD, röntgen) | Mineralogische analyse | [30] [31] [58] | Bodemkunde | Proefprojecten |
| Bepaling totale chemische samenstelling | Een totaalanalyse houdt in dat bepaald wordt welke elementen aanwezig zijn in het monster en in welke hoeveelheid | [30] | Bodemkunde milieustudies | Nee |
| Methyleenblauw-methode | Bepaling totaal specifiek oppervlak van kleideeltjes Bepaling hoeveelheid zwellende kleimineralen | [30] | Civiele techniek, baksteen | Proefprojecten |
| Gasabsorptietest | Reactief oppervlak kleimineralen (specifiek oppervlakte kleideeltjes) wordt direct bepaald | [34] | Bodemkunde milieustudies | Nee |
| Bepaling kationbezetting absorptiecomplex | Bepaalt mede het krimp-/zwellgedrag | [34] | Bodemkunde milieustudies | Proefprojecten |
| Zweltest (ASTM D698) | Bepaling eendimensionale zwelling van klei in oedometer | [30] | Ja | Proefprojecten |
| Enslin-test | Bepaling zwel- en krimpgedrag, wordt toegepast bij keuring van Trisoplast | [32] | Ja | Nee |
| Bepaling krimpgrens | Bepaling minimum watergehalte waarbij klei bij uitdroging niet meer in volume afneemt (en dus geen verder scheurvorming meer zal ontwikkelen) | [33] | Ja | Nee |
| Bepaling krimpgetal | Bepaling volume-afname bij uitdroging (voor het bereiken van de krimpgrens) | [34] | Ja | Proefprojecten |
| Bepaling kleefgrens | Bepaling minimum watergehalte waarbij klei begint te kleven | [34] | Ja | Proefprojecten |
| Structuurbeschrijving (Kruse-methode) | Classificatie conform beschrijvingen Kruse | [16] | Dijken | Proefprojecten |
| Structuurbeschrijving (Vitone-methode) | Classificatie conform keuzetabel | [35] | Zwelklei-onderzoek | Nee |

| Proef | Doel | Bron | Gangbaarheid algemeen | Gangbaarheid bij Nederlandse dijken |
|---|--|--------------|-----------------------|---|
| Structuurbeschrijving (NEN-EN-ISO 14688-methode) | Uitgebreide NEN-identificatie | [10] | Ja | Nee |
| Profielkuilbeschrijving (Hijma-methode) | Meerdere testen en waarnemingen in profielkuil | [36] | Proefprojecten | Proefprojecten |
| Profielkuilbeschrijving (Kruise-methode) | Meerdere testen en waarnemingen in profielkuil | [16] | Proefprojecten | Proefprojecten ontwikkeling beoordelen klei voor dijken |
| Steile wand test | Meet samenhang klei door de rand van een 0,2 m hoge loodrechte afgraving te belasten | [43] | Nee | Proefprojecten |
| Saturo | Indirect meten bodemstructuur door meten vochtindringing vanaf oppervlak | [39] | Bodemkunde | Nee |
| <i>Doorlatendheid</i> | | | | |
| Laboratorium doorlatendheidsproef (falling head test) | Doorlatendheid op laboratoriummonster | [13] | Ja | Ja |
| In-situ doorlatendheidsproef (Hvorslev-test) | In-situ doorlatendheid | [13] | Ja | Ja |
| In-situ doorlatendheidsproef infiltratiebak | In-situ doorlatendheid | [13] | Ja | Ja |
| <i>Erosiebestendigheid</i> | | | | |
| Bepaling kationuitwisselingscapaciteit | Deze meting geeft aan in welke mate de grond in staat is om de kationen Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ uit te wisselen | [30] | Bodemkunde | Proefprojecten |
| Bepaling water-dispergeerbare klei (dispersie ratio) | Dit is het kleigehalte door dispersie met water, zonder aan het monster een ander dispergerend product toe te voegen. | [30] | Bodemkunde | Nee |
| Bepaling exchangeable sodium percentage (ESP) | Bepaalt de mate van gedragsverandering door zoutuitwissling | [30] | Ja | Proefprojecten |
| Kantelgoottest/stroomgootproef | Erodeerbaarheid bij stroming | [38] | Ja | Nee |
| Test met erosie functie apparaat (EFA) | Erodeerbaarheid bij stroming | [38] | Ja | Nee |
| Jet erosie test (JET) | Weerstand tegen headcuterosie | [38] | Ja | Nee |
| Roto erosiemeter test (RETA) | Erosieweerstand bij stroming op laboratoriummonster | [38] [34] | Ja | Nee |
| Boorgat erosie test (BET) | In-situ erosieweerstand bij stroming | [38] | Ja | Proefprojecten |
| Impact drukmachinetest | Erodeerbaarheid van gestructureerde klei | [38] | Ja | Nee |
| Pocket erodometer test (PET) | Kleinschalige jet erosietest met waterpistool | [38] | Ja | Nee |

| Proef | Doel | Bron | Gangbaarheid algemeen | Gangbaarheid bij Nederlandse dijken |
|---|---|--------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Pinhole erosion test (ASTM D4647) | Kleinschalige erosietest voor erosie van klei door pipe | [39] | Ja | Proefprojecten |
| Golfgootproef | Erosieweerstand en erodeerbaarheid bij golfbelasting | [40] [34] | Ja | Ja |
| Hydraulic fracture test | Sterkte en doorlatendheid grond met bodemstructuur i.v.m. erosie | [31] | Ja | Nee |
| Brandslangmethode | Meet erosie in het veld door een brandslang met speciale platte 10 cm brede spuitmond | [34] | Proefprojecten | Proefprojecten |
| Bepaling scour rate in cohesive soils (SRICOS) | Bepaling van de kritieke erosiesnelheid | [41] | | |
| <i>Vormvastheid</i> | | | | |
| Versnelde rijpingsproef | Simuleren gedrag na rijping | [42] | Proefprojecten | Nee |
| Klimaatkamerproef | Simuleren gedrag na rijping | [43] | Nee | Proefprojecten |
| Oxidatietest | Bepaalt effect van oxidatie op doorlatendheid, is toegepast bij onderzoek naar Trisoplast | [32] | Proefprojecten | Nee |
| Bepaling California Bearing Ratio (CBR) | In-situ draagvermogen van de grond, verwekingsgevoeligheid | [34] | Ja | Proefprojecten |
| Valgewicht deflectiemeting | In-situ dynamisch stijfheid, van belang bij wegaanleg | [42] | Ja | Ja |
| <i>Verwerkbaarheid</i> | | | | |
| Normale meerpuntsproctorproef | Verdichtingsgraad in relatie tot het watergehalte | [15] | Ja | Ja |
| Verzwaarde meerpuntsproctorproef | Verdichtingsgraad in relatie tot het watergehalte, maar met een hogere verdichtingsenergie dan een normale Proctorproef | [15] | Ja | Proefprojecten |
| <i>Sterkte</i> | | | | |
| Tensiometer test | Bepaling in-situ zuigspanningen | [44] | Bodemkunde | Proefprojecten |
| Tijd domein reflectometrie (TDR) vochtigheidsmeting | Bepaling in-situ waterspanningen | [34] | Bodemkunde | Proefprojecten |
| Triaxiaalproef | Sterkte, stijfheid, verwekingsgevoeligheid | [13] | Ja | Ja |
| Grootschalige trekproef op kleikubus | Bepaling bulksterkte van gestructureerde klei | [34] | Tekentafel | Nee |
| Newcastle direct tension test (NDTT) | Bepaling treksterkte op kleimonster | [45] | Zwelklei-onderzoek | Nee |
| <i>Begroeibaarheid</i> | | | | |
| Bepaling zuurgraad | Bepaling zuurgraad (pH) | [30] | Bodemkunde | Nee |
| Bepaling bodemmicrobiologische processen | Bepaling biologische activiteit in de bodem | [46] | Bodemkunde | Nee |
| Bepaling CN-ratio (carbon-to-nitrogen ratio) | Meet de stabiliteit van organische stof via de koolstof-stikstofverhouding | [41] | Bodemkunde | Nee |

| Proef | Doel | Bron | Gangbaarheid algemeen | Gangbaarheid bij Nederlandse dijken |
|--|---|------|-----------------------|-------------------------------------|
| Electric conductivity meting (EC) | Meet totale zoutconcentratie in bodemvocht | [41] | Bodemkunde | Nee |
| <i>Verwekingsgevoeligheid</i> | | | | |
| Samendrukkingsproef/ constant rate of strain (CRS) | Samendrukbaarheid, doorlatendheid, overconsolidatie, collapse potential | [13] | Ja | Ja |

Voorbeelden maatwerkproeven

*De bestaande keileemkern van de **Wieringermeerdijk** voldeed op basis van de samenstelling van deze grond niet aan de standaard erosiebestendigheidseisen. Met grootschalige golfgootproeven in de Deltagoot is geprobeerd om aan te tonen dat de erosiebestendigheid toch significant is om zodoende de harde bekleding op de dijk niet te hoeven vervangen [2]. Dit is gedeeltelijk gelukt.*

*Voor **Dijkversterking Ooijen-Wanssum** zijn, naast golfgootproeven, pinhole erosietesten gedaan. Dit zijn kleinschalige laboratoriumproeven om op een snelle en betaalbare manier inzicht te krijgen in de erodeerbaarheid van grond. Op basis van deze testen zijn erosiebuffers van siltige klei en silt ontworpen en gerealiseerd [2].*

*Bij de **waterbufferdammen in Zuid-Limburg** is een prognose gedaan van het effect van extra verdichting. Deze dammen zijn opgebouwd uit silt (löss). Het effect van verbeterde verdichting in dunne lagen door bulldozers is in het laboratorium nagebootst door het silt met een procotorhamer te verdichten tot 100% proctordichtheid. Vervolgens is met triaxiaalproeven de sterkte bepaald van zowel deze kunstmatig verdichte monsters als van de ongeroerde monsters met de oorspronkelijke verdichting. Hieruit is de meerwaarde van verdichten herleid.*

4 Nuanceren van de standaardeisen voor dijksmateriaal

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft hoe klei functioneel kan worden ingepast in dijkversterkingsontwerpen. Gericht op gebiedseigen grond, die kan afwijken van standaard dijksmateriaal. We beginnen met mogelijke oplossingen om onderbouwd af te wijken van de eisen. Daarbij wordt het verschil tussen traditionele en functionele ontwerpen toegelicht. Daarna wordt ingegaan op de relevante grondeigenschappen die horen bij functionele eisen van dijkonderdelen. Vervolgens behandelen we de beïnvloeding van veroudering van klei. Met voorbeeldprojecten lichten we toe hoe is omgegaan met afwijkende grond en veroudering. De toepassingsmogelijkheden van (afwijkend) zand in dijkversterkingen vallen buiten de scope van dit Technisch kader.

4.2 Mogelijkheden voor onderbouwd afwijken

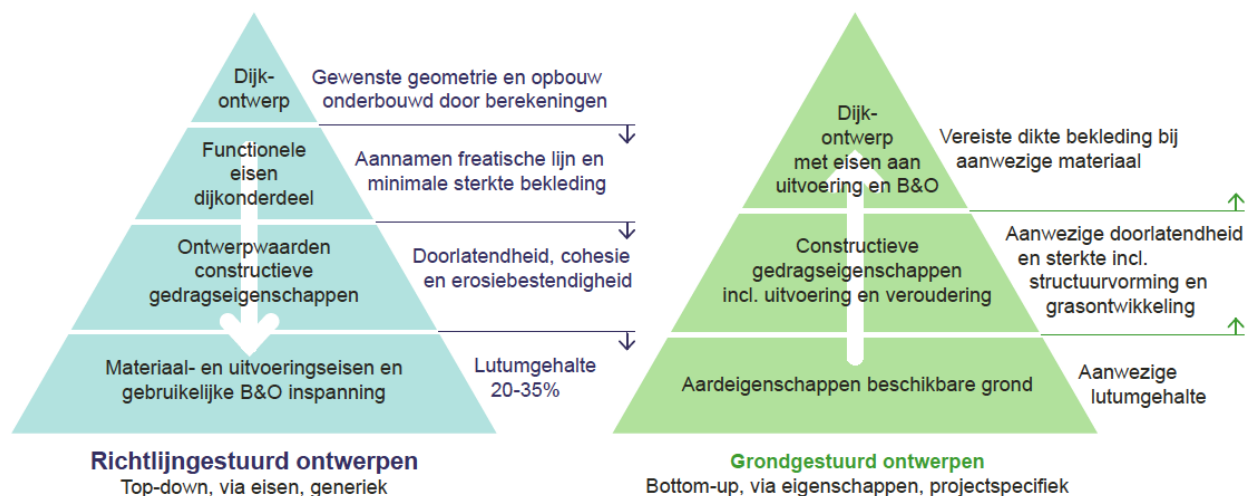
Het toepassen van gebiedseigen grond verloopt volgens een aantal stappen. Om onderbouwd van de eisen af te wijken zijn eerder vier mogelijkheden benoemd:

1. Nuanceren van de standaard materiaaleisen door terug te gaan naar functionele eisen.
2. Ruimte zoeken in het ontwerp.
3. Opwaarderen van grond tijdens de uitvoering.
4. Aanpassen van het beheer en onderhoud na realisatie.

De eerste mogelijkheid – functionele toepassing – komt in dit hoofdstuk aan bod. Denk hierbij aan het oprekken van toleranties bij standaardeisen, mits dat vanuit achterliggende functionele eisen te verantwoorden is. Of aan fundamenteel onderzoek waarbij constructieve gedragseigenschappen rechtstreeks worden onderzocht. De andere drie mogelijkheden worden in hoofdstuk 5 behandeld. Deze stappen zijn ook terug te vinden in het stroomschema uit de inleiding (zie Figuur 1)

4.3 Traditioneel versus functioneel ontwerpen

De centrale vraag bij functionele toepassing is wat kan met beschikbare grond, in plaats van welke grond nodig is voor het ontwerp. Figuur 12 laat dit verschil zien met de eerder geïntroduceerde piramiden (zie Figuur 6), toegepast op de aardeigenschap lutumgehalte.



Figuur 12 Richtlijngestuurd ontwerpen in vergelijking met functioneel, grondgestuurd ontwerpen, toegepast op de aardeigenschap lutumgehalte

4.4 Relevante grondeigenschappen per functie

Een eerste vereiste bij grondgestuurd ontwerpen is dat duidelijk is hoe materiaaleigenschappen het dijkontwerp beïnvloeden. Hierna worden daarom materiaaleigenschappen en functionele eisen behandeld die meestal aan klei worden gesteld en de achtergronden ervan. Eerst is toegelicht hoe constructieve eigenschappen en materiaaleigenschappen met elkaar samenhangen en hoe hier structuur in kan worden aangebracht. Dan leggen we uit waarom het belangrijk is om bij grondgestuurd ontwerpen verder te kijken dan de standardeisen uit paragraaf 3.4. Vervolgens lichten we toe in welke gevallen onderbouwd kan worden afgeweken van de standardeisen. Andersom zijn er ook situaties denkbaar waarin wordt voldaan aan de standardeisen, maar wanneer het toch verstandig is om het materiaal nader te onderzoeken. Dit wordt in aansluitend beschreven.

4.4.1 Structuur in eigenschappen en eisen

In paragraaf 2.8 is uitgelegd hoe structuur in materiaaleigenschappen en -eisen kan worden aangebracht. We lichten dit nu nader toe voor het dijkontwerp. Constructieve gedragseigenschappen hebben betrekking op het totale gedrag van een constructie of onderdeel daarvan. De structuur in eisenaanpak [47] wordt gevolgd. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen eisen die bepaald worden door de samenstelling (aardeigenschappen) en door het gedrag van de grond (elementaire gedragseigenschappen). Elementaire gedragseigenschappen zijn gedragingen van een representatieve kleine hoeveelheid materiaal. Aardeigenschappen hebben betrekking op chemisch mineralogisch, fysische en morfologische aspecten zonder enige gedragsimplicatie. De belangrijkste voorbeelden per categorie zijn in Tabel 13 opgesomd.

Tabel 13 Voorbeelden gedragseigenschappen en aardeigenschappen

| Constructieve gedragseigenschappen | Elementaire gedragseigenschappen | Aardeigenschappen |
|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Structuur | Structuur (microschaal) | Mediane korrelgrootte |
| Doorlatendheid | Doorlatendheid (microschaal) | Korrelgradering |
| Erosiebestendigheid | Erosiebestendigheid (microschaal) | Korrel dichtheid |
| Vormvastheid | Erodeerbaarheid | Lutumgehalte |
| Verwerkbaarheid | Stijfheid | Organisch stofgehalte |
| Sterkte | Hoek van inwendige wrijving | Watergehalte |
| Gewicht | Cohesie | Grove bijmengingen |
| Begroeibaarheid | Mate van cementatie | Kalkgehalte |
| Verwekingsgevoeligheid | Gewicht (microschaal) | Zoutgehalte |
| | Verdichtingsgraad | Verkleuringen |
| | Verzadigingsindex | Opvallende geuren |
| | Fabric | Mineralogie |
| | Vloiegrens | Biologische activiteit |
| | Krimpgrens | Verbrijzelingsindex |
| | Kleefgrens | Korrelvorm |
| | Uitrolgrens | Voedingstoffen |
| | Plasticiteitsindex | |
| | Consistentie-index | |
| | Activiteit | |
| | Gevoeligheid | |
| | Grensspanning | |
| | Zwelindex | |
| | Collapse potential | |

De aardeigenschappen beïnvloeden de elementaire gedragseigenschappen en daarmee ook de constructieve eigenschappen. Anders gezegd: de samenstelling van het dijkmateriaal heeft invloed op het functioneren van dijkonderdelen. In Tabel 14 is deze invloed samengevat voor de belangrijkste aardeigenschappen en enkele elementaire grondeigenschappen. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de grondeigenschappen die gerelateerd

zijn aan standaard RAW-eisen en aan overige eigenschappen. De standaard RAW-eigenschappen zijn nader toegelicht in bijlage 2, de overige grondeigenschappen komen zijdelings aan bod in paragraaf 4.5 over veroudering.

Tabel 14 *Beïnvloeding constructieve gedrageigenschappen door aard- en elementaire eigenschappen*

| Constructieve gedrageigenschappen | Grondeigenschappen (RAW-eisen) | | | | | | | | | | | | Overige grondeigenschappen | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|------------------|-------------|-------------|--------------------|------------|--------------------|---------------|-----------------|-------------------|----------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|--------|--------------------|---------------|-----------|
| | zandgehalte | lutumgehalte | watergehalte | org. stofgehalte | kalkgehalte | zoutgehalte | plasticiteitsindex | vloeigrens | grove bijmengingen | verkleuringen | afwijkende geur | verdichtingsgraad | mineralogie | biologische activiteit | verzadigingsindex | krimpgetal / zwelindex | fabric | collapse potential | grensspanning | bemesting |
| Structuur | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Doorlatendheid | X | X | X | X | X | | X | X | X | | | X | X | X | X | X | | | X | |
| Erosiebestendigheid | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | X | | X | X |
| Vormvastheid | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | | X | X | | X | X | | | X | |
| Verwerkbaarheid | X | X | X | X | | | X | X | X | | | X | | X | | X | X | X | | |
| Sterkte | X | X | X | X | | | X | X | | | | X | | | | | | | X | |
| Gewicht | X | X | X | X | X | | | | X | | | X | | X | X | | | | | |
| Begroeibaarheid | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | | | X |
| Verwekingsgevoeligheid | X | X | | | | | | | | | | X | X | | | X | X | X | | |

Tabel 14 illustreert dat constructieve eigenschappen afhankelijk zijn van een complex samenspel van grondeigenschappen. Erosiebestendigheid bijvoorbeeld is onder meer afhankelijk van de korrelverdeling (zandgehalte en lutumgehalte), de aanwezigheid van 'lijmstoffen' (organisch stof- en ijzer-aluminiumverbindingen, silica en calciumverbindingen) en mineralogische opbouw (bodemstructuur en microstructuur). Als de erosiebestendigheid niet direct kan worden gemeten of als een voorspelling moet worden gedaan over tijdsafhankelijke veranderingen, dan moet informatie worden ingezameld over deze grondeigenschappen.

4.4.2 Duiding van standardeisen voor dijksmateriaal

In de huidige praktijk wordt met eisen vastgelegd waaraan de samenstelling van dijken moet voldoen. Deze eisen zijn vooral afkomstig uit de RAW (zie paragraaf 3.4) met aanvullingen uit enkele andere documenten. Hieronder zijn deze nogmaals opgesomd:

- Grondsoort is klei conform NEN 5104.
- Organisch stofgehalte (gewichtsverlies bij waterstofperoxidebehandeling) lager dan 5%.
- Zoutgehalte (NaCl) lager dan 4% per liter bodemvocht.
- Kalkgehalte (HCl-massaverlies) lager dan 25%.
- Geen extreme verkleuringen bij ontgraven en drogen (helder rood, helder geel, helder blauw of veel zwarte plekken).
- Geen afwijkende sterke geur (rotte eieren, olie- of kolenachtig).
- Geen significante bijmengingen van puin, grind, wortels van planten, plastic, houtresten en dergelijke.
- Eisen aan de Atterbergse grenzen (afhankelijk van de toepassing).
- Eisen aan het lutumgehalte (afhankelijk van de toepassing).

Deze standardeisen zijn al langer in gebruik en hebben zich in de tijd grotendeels bewezen. Door te voldoen aan dergelijke standardeisen, worden voor dijkenbouw relevante functies impliciet gevangen. Bij de toepassing van gebiedseigen grond wordt echter vaak niet voldaan aan een of meer standardeisen. Dit leidt tot een aantal knelpunten:

1. De eisen zeggen niets over de voorkomende waarden. Een eis zegt op zichzelf niets over de kans dat de in Nederland beschikbare kleisoorten hieraan voldoen. Om de relevantie van een eis te kunnen duiden en vast te stellen in hoeverre een partij gebiedseigen grond afwijkt van wat gangbaar is, is per parameter inzicht nodig in de waarden die in de praktijk kunnen voorkomen.
2. Het effect van de eisen op dijkfuncties is niet helder. Om gebiedseigen grond met afwijkende eigenschappen effectief te kunnen toepassen, is inzicht nodig in hoe een bepaalde eigenschap het dijkgedrag beïnvloedt. Dit kan niet herleid worden uit alleen een numerieke grenswaarde voor een enkele parameter.
3. De grenswaarden uit de literatuur zijn niet overzichtelijk. De meeste grenswaarden zijn afkomstig uit de RAW, maar in andere documenten worden ook grenswaarden aangehaald. Het overzicht ontbreekt daardoor.
4. De consequentie bij afwijking van grenswaarden is niet duidelijk. In richtlijnen zijn vaak alleen de eisen vermeld en is niet in alle gevallen omstandig toegelicht waarop deze zijn gebaseerd. De parameters van gebiedseigen grond voldoen soms niet aan één of meer van de standardeisen. Het is dan niet direct duidelijk wat de consequenties zijn bij een afwijking van de grenswaarden.
5. Er zijn weinig kwantitatieve verbanden bekend die het materiaalgedrag bij afwijking van de eis beschrijven. Als gebiedseigen grond met afwijkende eigenschappen in een dijkontwerp wordt toegepast, dan is er behoefte aan rekenkundige verbanden die het effect van een afwijking op een constructieve functie van de dijk berekenen. Deze kwantitatieve verbanden zijn vaak niet bekend en niet te herleiden omdat ze het resultaat zijn van combinaties van gemeten materiaaleigenschappen. Er kan daarom niet eenvoudig een verband tussen parameterwaarden en gedrag vastgesteld worden.

Bovenstaande knelpunten zijn toegelicht voor de materiaaleigenschap 'kalkgehalte'. In de praktijk wordt dit gemeten door gewichtsverlies bij HCl-behandeling, waarbij het kalkgehalte volgens de eis lager moet zijn dan 25%. Als hieraan niet wordt voldaan, dan biedt de RAW-eisenlijst geen extra informatie. Relevante vragen die men dan wil beantwoorden zijn bijvoorbeeld:

- Hoe kan worden verklaard dat de klei uit een bepaalde bron een hoog kalkgehalte heeft?
- Wat gaat er mis als deze kalkrijke klei toch wordt toegepast in een dijk? En wanneer merk je dat?
- De dijkbeheerder wil graag een bloemrijke grasmat creëren. Stelt dat aanvullende eisen aan het kalkgehalte?
- Stel dat het kalkgehalte bij een enkele meting 26% is. Hoe erg is dat?
- Stel dat ik voor de verwerkbaarheid een bepaalde hoeveelheid extra kalk toevoeg. Wat gebeurt er dan?

Bijlage 2 helpt bij deze vragen. Hierin worden de standaardparameters bij materiaalkundig onderzoek op dijkkenlei toegelicht. Deze standaardparameters zijn:

- Plasticiteitsindex.
- Vloeigrens.
- Zandgehalte.
- Organisch stofgehalte (gewichtsverlies bij H₂O₂-behandeling)
- Kalkgehalte (gewichtsverlies bij HCl-behandeling)
- Zoutgehalte.
- Lutumgehalte.
- Verkleuringen en afwijkende geuren.
- Hoeveelheid vreemd materiaal (puin, hout).

De kwaliteit van dijksmateriaal uit een depot wordt in de huidige praktijk dus getoetst op de samenstelling en niet op de structuur of het elementaire gedrag. Bovenstaande parameters zijn immers bijna allemaal aardeïenschappen. De Atterbergse grenzen (plasticiteitsindex en vloeigrens) en verkleuringen en afwijkende geuren vormen een uitzondering. De Atterbergse grenzen kunnen alleen worden bepaald op een minimale hoeveelheid grond en het zijn daarom elementaire gedragseïenschappen. Ze worden echter bepaald door de samenstelling, geabsorbeerde stoffen (zoals zout, kalk en organische stof) en poriënvloeistof [16] en zijn dus indirect grotendeels gebaseerd op aardeïenschappen. Het functioneren van dijksmateriaal, en onder andere welke structuur en stijfheid de grond krijgt na aanbrengen, volgt uit deze samenstelling en fysisch chemische karakteristieken (van belang voor de Atterbergse grenzen).

Voorbeelden toepassing gebiedseigen grond volgens standaardeisen

Baggerspecie is gebiedseigen grond die afwijkt van standaard dijksmateriaal. De grondsoort kan door rijping worden omgezet in klei. Hierdoor nemen het watergehalte en het organisch stofgehalte af. In gunstige gevallen geeft dit klei die voldoet aan de standaard RAW-eisen voor toepassing in dijken [23].

*Bij het project **Waterdunen** in Zeeuws-Vlaanderen is de dijkversterking gecombineerd met grootschalige natuurontwikkeling. Dit was mogelijk door het hele gebied binnen één plan te herontwikkelen. Hierdoor kwam lokaal veel geschikte klei vrij, die in de dijk kon worden verwerkt [2], deels na behandeling met ongebluste kalk.*

*De versterking van de **Grebbe dijk** maakt vooraf een koppeling met kleiwinning voor een project van de Kaderrichtlijn Water (KRW). Zo wordt gebiedseigen grond efficiënt hergebruikt [2].*

4.4.3 Werkwijzen bij nuanceren standaardeisen

Het nuanceren van de standaard materiaaleisen is dus één van de mogelijkheden om af te wijken van de standaardeisen. Dit kan op twee manieren:

1. Door aan te tonen dat een afwijkende eigenschap niet relevant of significant is. Hierbij zijn verschillende mogelijkheden:
 - a) De gevolgen van de afwijking zijn niet relevant voor de functie van het dijkonderdeel (zie bijlage 2).
 - b) Met gericht fundamenteel onderzoek wordt aangetoond dat een eis voor de ontwerpsituatie kan worden aangescherpt (zie specialistische proeven uit paragraaf 3.5.5).
 - c) De negatieve gevolgen worden voldoende gecompenseerd door de voordelen van dit materiaal.
 - d) De afwijking is niet significant (zie paragraaf 4.5).
2. Door aan te tonen dat een afwijking tijdens de planperiode van een dijkversterking niet tot problemen leidt.

Voorbeelden onderbouwd afwijken

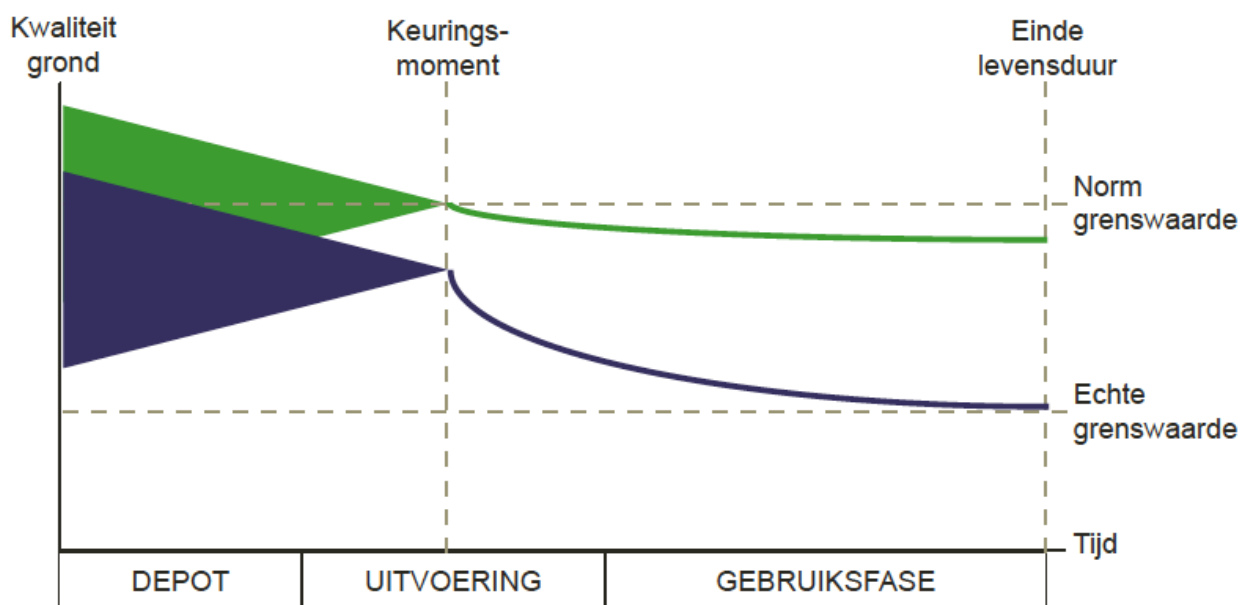
*1a) Bij **Dijkversterking Wolferen - Sprok** zijn voor dieper gelegen delen van de binnenbekleding de standaardeisen voor het lutumgehalte in de klei losgelaten. De reden is dat er in die zones minder strenge eisen gelden voor de doorlatendheid en de erosiebestendigheid [2]. Een ander voorbeeld is de buitenwaartse versterking van de **IJssel- en Markermeerdijken**. Daar kwam puin vrij, dat onder de steenbekleding lag. Puin is materiaal dat niet in standaard dijkontwerpen voorkomt. Het puin is echter toegepast onderin de kern van de versterkte dijk. Daardoor zijn de minpunten van puin (hoge doorlatendheid, lage erosiebestendigheid, onvoorspelbare sterkte) niet zo relevant [2].*

1b) Bij het Zuid-Limburgse dorp **Meerssen** zijn dammen gebouwd met löss. Deze löss is mogelijk te nat verwerkt en onvoldoende verdicht. Door middel van triaxiaalproeven bij verschillende verdichtingsgraden is echter aangetoond, dat het materiaal voldoende sterk was [48].

1c) Bij de **Zuiderzeewerken** is keileem toegepast, ondanks dat dit materiaal qua samenstelling afwijkt van de destijds gezochte klei voor de dijken. Een voordeel van keileem is echter dat het sterk overgeconsolideerd is en daarom relatief erosiebestendig is. Op basis van schaal- en praktijkproeven is aangetoond dat dit materiaal in bepaalde onderdelen van dijken (opsluitdammen onder water) voldoende voldeed onder de omstandigheid dat er geen ander materiaal beschikbaar was.

1d) Er kan net niet aan een eis worden voldaan door onnauwkeurigheid van de meetmethode of doordat een beperkt deel van de metingen in ongunstige zin afwijkend is. Grond is immers nooit geheel homogeen. Dit hoeft niet direct te leiden tot afkeuring van de partij grond. In het rapport "**Vier quick wins grond en klei**" [4] staan nuttige handvatten met achtergronden voor het toepassen van toleranties bij gebruik van de categorie-indeling voor erosiebestendigheid. Hierin is bijvoorbeeld toegelicht dat bij een kleikeuring op het werk minder strenge eisen kunnen worden gesteld als bij een eerdere keuring van deze grond in het depot al aan de eisen werd voldaan.

Hierna gaan we dieper in op de tweede manier om af te wijken van de standaard-eisen: aantonen dat een afwijking tijdens de planperiode van een dijkversterking niet tot problemen leidt. Bepaalde eigenschappen van grond kunnen na verloop van tijd slechter worden, waardoor de kwaliteit van de grond afneemt. Voorbeelden zijn een verminderde erosiebestendigheid en sterkte en een verhoogde doorlatendheid door structuurvorming. Een afwijking leidt tijdens de planperiode van een dijkversterking niet tot problemen als eventuele verslechtering in materiaaleigenschappen door veroudering voldoende beperkt is. Dit is geïllustreerd in figuur 14. Daarin is de kwaliteit van de grond uitgezet tegen de tijd met achtereenvolgens de voorbereidingsfase (grond ligt in een depot), de uitvoeringsfase (grond wordt verwerkt in de dijk) en de gebruiksfase (grond zit in dijk).



Figuur 13 De kwaliteit van de grond uitgezet tegen de tijd. Te zien valt dat als de kwaliteit binnen de grenswaarde blijft, toepassing verantwoord is.

De standaard werkwijze is met paars weergegeven. De driehoek links illustreert dat de kwaliteit van grond in het depot en tijdens uitvoering kan veranderen. De kwaliteit kan verslechteren, bijvoorbeeld door regenval bij verwerken of vermenging met andere materialen. De kwaliteit kan echter ook verbeteren door natuurlijke processen of bewerking. Op een zeker moment tijdens de uitvoering wordt de grond gekeurd. Dan moet de kwaliteit minimaal gelijk zijn aan de grenswaarde in de norm ('norm grenswaarde'). Daarna kan de grondkwaliteit door veroudering nog in een afnemend tempo achteruitgaan. Bij de standaard werkwijze is het principe echter dat veroudering kan worden verwaarloosd.

De afwijkende werkwijze houdt wél rekening met deze ongunstige veroudering. Deze werkwijze is met grijs weergegeven. Hierbij kan de kwaliteit van de grond in het depot en tijdens uitvoering ook veranderen, zie de grijze driehoek links. Het verschil is echter dat een onderschrijding van de 'norm grenswaarde' tijdens het keuringsmoment wordt toegestaan. Wel moet worden onderbouwd dat eventuele negatieve gevolgen van veroudering beperkt blijven. Dat kan enerzijds door inhoud van de veroudering tijdens de levensduur te kwantificeren. En anderzijds door de 'echte grenswaarde' te bepalen die aan het einde van de gebruiksfase van toepassing is. Als de kwaliteit van de afwijkende grond daarboven blijft, dan is toepassing verantwoord.

De 'echte grenswaarde' en de kwaliteitsafname tijdens de gebruiksfase kunnen niet eenvoudig uit een norm worden gehaald. Dit vergt een analyse van de relevante factoren. We kunnen dit toelichten voor een deelaspect dat de kwaliteit van grond beschrijft: de vormvastheid. De vormvastheid van de dijk is afhankelijk van het organisch stofgehalte. In de standaard werkwijze is de 'norm grenswaarde' dat de grond vormvast is, ofwel een niet-significante klink heeft. Dit wordt onder meer gegarandeerd door tijdens de uitvoering aan de 'norm grenswaarde' conform de RAW te toetsen, die voorschrijft dat het organisch stofgehalte lager moet zijn dan 5%. Stel dat niet aan deze eis wordt voldaan, dan zou men de dijk 8% hoger kunnen aanleggen. De 'echte grenswaarde' voor vormvastheid is dan dat de klink minder moet zijn dan 8%. Het klinkpercentage kan globaal gelijk worden verondersteld aan het percentage organische stof. Anders gezegd: bij een organisch stofgehalte van maximaal 8% tijdens uitvoering is de kwaliteitsafname voor het deelaspect vormvastheid voldoende klein, zodat aan de 'echte grenswaarde' hiervoor wordt voldaan.

Figuur 13 is uiteraard een versimpelde weergave van de werkelijkheid. Bij een dijkversterkingsproject is geen sprake van één keuringsmoment tijdens de uitvoering, maar van vele. Daarnaast is de kwaliteit van grond afhankelijk van meerdere parameters en per parameter gelden aparte grenswaarden. Ook is sprake van fysische verbanden tussen alle verschillende parameters en grenswaarden. Een hoog zandgehalte gaat bijvoorbeeld meestal gepaard met een laag lutumgehalte. In sommige gevallen is een combinatie van grenswaarden van belang, zoals bij de bepaling van de erosiebestendigheid.

Ten slotte benadrukken we dat het niet in alle gevallen mogelijk is de standardeisen te nuanceren. Niet voor ieder materiaal is compensatie in dikte of uitvoeringswijze mogelijk. Er zijn wel degelijk absolute ondergrenzen aan bepaalde aardeigenschappen.

4.4.4 Mogelijke redenen afwijkingen bij dijkmateriaal

Bij de toepassing van afwijkende gebiedseigen grond zijn verschillende *best* en *worst practises* geïnventariseerd [3]. Op basis daarvan is een aantal redenen te onderscheiden om bij nieuw dijkmateriaal naar andere parameters te kijken dan de standaardparameters uit paragraaf 4.2.2 en bijlage 2.

Sommige functies zijn onderbelicht

Veel onderzoek naar klei voor dijken is primair gericht op de functie erosiebestendigheid, terwijl andere functies onderbelicht zijn. Zo worden weinig eisen gesteld aan de begroeibaarheid van klei in een substraatlaag van een grasmat. Hierbij kan bijvoorbeeld naar de zaden en voedingsstoffen in de grond worden gekeken.

Het type grond is afwijkend van standaard klei

Bij de gebruikelijke kleisoorten in Nederland zijn sommige eigenschappen, zoals de korrel dichtheid, de korrelgradering, de verbrijzelingsindex en de overconsolidatiegraad, niet bepalend voor het ontwerp of nauwelijks variabel. Dit kan veranderen als afwijkende kleisoorten, keileem of silt worden toegepast. Bij keileem is na vergraven de *collapse potential* bijvoorbeeld van belang.

Het letten op onconventionele afwijkingen wordt zeer relevant bij toepassing van klei uit het buitenland of van een alternatief, niet-natuurlijk materiaal dat lijkt op klei. In dat geval moet worden beoordeeld of er 'exotische' parameters zijn, die mogelijk afwijkend zijn en invloed kunnen hebben op functionele eigenschappen. Een voorbeeld is Noordse Leem. Dit is fijnkorrelige grond, die vrijkomt bij de winning van graniet in Noorwegen en Schotland voor de grindvoorziening. Deze grond heeft gelijkenissen met klei zoals een lage doorlatendheid. Maar het poriënvolume bijvoorbeeld is circa 43% in plaats van de gebruikelijke 60% voor klei. Dit leidt na verwerking doorgaans tot een hogere sterkte [49]. Meer voorbeelden van afwijkende kleisoorten staan in Tabel 15.

Tabel 15 Voorbeelden van (buitenlandse) kleisoorten met afwijkende eigenschappen [50]

| Grondsoort | Risico |
|------------------------------------|---|
| Antropogene klei | Mogelijk verontreinigd |
| Kalkhoudende klei | Verkitting door neerslag van kalk of holtevorming door oplossing van kalk |
| Dispersieve klei | Interne erosie |
| IJzerhoudende klei | Verkitting |
| Actieve klei (quick clay) | Plotseling sterkteverlies mogelijk door belasting |
| Zwelklei | Sterke volumeverandering bij verandering vochtgehalte |
| Gelaagde klei | Anisotropie in eigenschappen |
| Koolhoudende klei | Ontvlambaar |

Naast aardeigenschappen zijn ook de elementaire gedragseigenschappen relevant

In een depot worden alleen de aardeigenschappen getest. Die zijn onafhankelijk van de structuur van het materiaal. De structuur is medebepalend voor de elementaire gedragseigenschappen en het functioneren van de dijk. In de RAW-methodiek wordt dit deels afgedekt door twee uitvoeringseisen te stellen aan klei in dijken. De verdichtingsgraad moet hoog genoeg zijn en de consistentie-index moet binnen een bepaalde range liggen. Dit zijn eisen die pas bij aanleg worden getoetst. Meer hierover staat in hoofdstuk 5.

Elementaire gedragseigenschappen worden vaak pas bij uitvoering gerealiseerd. Toch kan het van belang zijn om sommige eigenschappen al bij materiaalkeuring na te bootsen en simuleren, anders dan al met de gebruikelijk vereiste waarden wordt verzekerd. De voorspelbaarheid voor afwijkende materialen en toepassingen is namelijk lastig, omdat de eigenschappen sterk worden beïnvloed door de wijze waarop de materialen worden aangebracht. Voorbeelden zijn:

- De erosieproeven op keileembrokken, voorafgaand aan de bouw van de Zuiderzeewerken.
- De versnelde rijping van baggerspecie om vroegtijdig de eigenschappen van klei van baggerspecie in constructieve ophogingen te bepalen [42].

De omstandigheden bij de dijk zijn bijzonder

Als een dijk in afwijkende omstandigheden wordt gebouwd dan kunnen bepaalde elementaire gedragseigenschappen belangrijker worden. Hierdoor kan het zinvol zijn om meer parameters van een materiaal te beproeven. Voorbeelden zijn:

- In droogtegevoelige dijkonderdelen, bijvoorbeeld op het zuiden gerichte taluds van veendijken met een kleibekleding, is het voorkomen van diepe krimp scheuren belangrijk. Voor een maatwerkanalyse kan het

nuttig zijn om gericht te kijken naar parameters die de mate van krimp bepalen. Dat zijn bijvoorbeeld de mineralogie, de krimpgrens en de zwelindex.

- In dijkonderdelen die in wisselend zoute en zoete omstandigheden staan, is het naast het zoutgehalte zinvol om naar zaken als het *sodium absorption ratio* (SAR) en de *exchangeable sodium percentage* (ESP) te kijken [31]

Er wordt afgeweken van de 'traditionele ontwerpmethod'

Functionele eisen aan dijkonderdelen kunnen wijzigen, doordat dijken volgens een andere ontwerpfilosofie worden maakt. Sinds de introductie van de nieuwe normering voor primaire waterkeringen in 2017 [51] is het bijvoorbeeld de standaard geworden om dijken te ontwerpen op een significante hoeveelheid golfoverslag en deels bezwijken van dijken door een afschuiving of erosie. Dit leidt tot de volgende, gewijzigde functionele eisen:

- Bij significante overslag wordt de eerdergenoemde begroeibaarheid van klei belangrijker om een overslagbestendige grasmat op het binnentalud te garanderen. Daarnaast worden de doorlatendheid van de kleibekleding en de erosiebestendigheid relevant [5].
- Bij het deels bezwijken van dijken door afschuiving is de sensitiviteit van klei belangrijk. Sensitiviteit is de verhouding tussen de sterkte van verzadigde klei na en voor verkneding door afschuiving [52]. De kleisterkte neemt af na een afschuiving.
- Bij het deels eroderen van dijken is niet de erosiebestendigheid, maar de erodeerbaarheid de ontwerpparameter. Deze is mede afhankelijk van de mate van structuurvorming, de heterogeniteit van de klei en de pakkingsgraad [38].

4.5 Beïnvloeding van grondeigenschappen door veroudering

Hierna gaan we eerst in algemene zin in op de beïnvloeding van eigenschappen door veroudering van dijksmateriaal. Daarna worden de mogelijke vormen van veroudering toegelicht, zoals compactie, oxidatie en erosie.

De eigenschappen van grond in een dijk blijven na aanleg van een dijkversterking niet hetzelfde. Ze veranderen in de tijd door verschillende beïnvloedingsfactoren. Een beïnvloedingsfactor is een natuurlijk proces dat tot één of meer verouderingsmechanismen kan leiden. Veroudering kan via een aantal processen plaatsvinden, zoals uitdroging, vorst-dooiwisselingen of cementatie of het verbreken daarvan. Toestandsparementers zijn meetbare grondeigenschappen die door veroudering kunnen veranderen, zoals het watergehalte, zuigspanningen en de rijpingsgraad [53]. Beïnvloeding vindt plaats door bewerking (actief) of door de omgeving (passief). Tabel 16 vat de belangrijkste beïnvloedingsfactoren en verouderingsprocessen bij dijkklei en de bijbehorende toestandsparementers samen.

Tabel 16 Verouderingsprocessen bij dijken en manieren om deze te beïnvloeden

| Beïnvloedingsfactor | Verouderingsproces | Belangrijke toestandsparementers | Beïnvloeding door bewerking (actief) | Beïnvloeding door omgeving (passief) |
|-------------------------|---|--|--|--|
| Temperatuur | Vorst-dooiwisseling, verandering watergehalte, zuigspanningen, structuurvorming | Watergehalte | Droging in weer en wind | Weer, vorst-dooiwisseling |
| Blootstelling aan lucht | Oxidatie, rijping, structuurvorming | Organisch stofgehalte, grondvolume, redox potentiaal | Drogen aan de lucht, omzetten van grond | Oxidatie |
| Grondwaterstand | Rijping, zuigspanningen, structuurvorming, verandering watergehalte | Consistentie-index, zuigspanningen, rijpingsgraad, redoxpotentiaal | Besproeiing, bevochtiging, afwatering, drainagevoorzieningen | Neerslag, verdamping, zetting ondergrond |
| Stroming van water | Erosie, verandering watergehalte | Grondvolume, structuur | Grondscheiding in bezinkbassin, selectie | Stroming, golfbelasting, |

| Beïnvloedingsfactor | Verouderingsproces | Belangrijke toestandsparameters | Beïnvloeding door bewerking (actief) | Beïnvloeding door omgeving (passief) |
|---------------------|---|---|--|---|
| | | | grond voor de toepassing | overslag, overloop, afstromend hemelwater |
| Stroming van lucht | Erosie, verandering watergehalte, zuigspanningen | Grondvolume | Ploegen, klei op ruggen zetten | Wind |
| Grondroering | Afname cementatie | Sterkte, homogeniteit, structuur | Graafwerkzaamheden, ploegen, grondtransport | Graafwerkzaamheden door derden, afschuivingen |
| Trillingen | Verwerking | Verdichtingsgraad, sterkte, stijfheid | Trilverdichting | Bouwactiviteiten, windturbines, golfklappen |
| Flora en Fauna | Biologische activiteit, oxidatie, rijping, structuurvorming, verandering watergehalte, zuigspanningen | Structuur, organisch stofgehalte, rijpingsgraad, zuigspanningen | Grondverbetering met bacteriën, losmaken bovenlaag, inzaaien met riet, soortenrijke grasmatten | Diergraverijen, begroeiing |
| Chemische processen | Cementatie, rijping, flocculatie, peptisatie | Sterkte, rijpingsgraad | Bijmenging additieven (kalk, hydraulisch bindmiddel) | Vegetatie, verzuring |
| Bovenbelasting | Verdichting, verwerking | Verdichtingsgraad, sterkte, grensspanningen | Verdichting met wals, vacuümconsolidatie, breken | Verkeer, kruierend ijs |

Veroudering kan het functioneren van een dijk zowel positief als negatief beïnvloeden. In sommige gevallen zijn de effecten onomkeerbaar, bijvoorbeeld als klei steviger wordt door uitdroging. Een extreem voorbeeld is de productie van bakstenen uit klei. De negatieve effecten van veroudering kunnen worden beperkt door eisen te stellen aan de samenstelling en verwerking van dijksmateriaal [16], zoals in de RAW-besteksystematiek gebeurt. Toepassing van klei met een voldoende laag organisch stofgehalte kan bijvoorbeeld leiden tot minder structuurvorming. Door eisen te stellen aan de minimale verdichtingsgraad, wordt de klink van grond na aanleg beperkt.

Vermoeing van grond

Voor veroudering worden verschillende termen gebruikt, vermoeing van grond is er één van. Deze term staat voor een verandering van grondeigenschappen in de tijd die nadelig is voor de veiligheid van een dijk. De mate van verandering is afhankelijk van bijvoorbeeld de grondsoort of de positie in de dijk.

Ontwikkelingen om naar veroudering te kijken

In de huidige ontwerppraktijk van dijken is het vanwege ingangseisen niet gangbaar om naar veroudering te kijken. Toch geven vier ontwikkelingen aanleiding om wél naar veroudering te kijken:

1. Er worden geavanceerde rekenmodellen ontwikkeld, met tijdsafhankelijke grondparameters. Een voorbeeld is het meenemen van zuigspanningen bij de modellering van sterkte in de onverzadigde zone [44] of het meenemen van structuur bij de erodeerbaarheid tijdens golfbelasting [38].
2. Door klimaatverandering neemt de mate van veroudering van dijksmateriaal toe [54]. Doordat periodes met extreme hitte en droogte, afgewisseld met steeds heviger neerslag, frequenter voorkomen. Een gevolg van veroudering is bijvoorbeeld overmatige scheurvorming in regionale waterkeringen tijdens droge zomers [55]. De parameters die relaties geven voor het evenwichtsvochtgehalte (I_c) moeten daarom worden aangepast aan de gemiddeld hogere temperaturen van grond, met name zomertemperaturen.

3. Invasieve of opnieuw geïntroduceerde planten en dieren verdringen de natuurlijk aanwezige soorten en hebben effect op de ontwikkeling van een continue en stevige graszode op dijken. Denk hierbij aan de Japanse duizendknoop, de rivierkreeft en de bever.
4. Juist bij grondgestuurd ontwerpen is het extra belangrijk om inzicht te hebben in veroudering omdat deze grond niet aan de standardeisen voldoet. Het is belangrijk om te onderzoeken of de effecten van veroudering voldoende zijn afgedekt.

We lichten hierna de mogelijke vormen van veroudering kort toe. Er worden twaalf vormen van veroudering onderscheiden. Ze worden apart beschreven, maar in de praktijk vormen ze een complex samenspel. De verouderingsprocessen zijn vooral kwalitatief beschreven. Het is lastig om generiek iets te zeggen over de snelheid en omvang waarmee de processen plaatsvinden bij dijken. Enerzijds omdat specifiek onderzoek hiernaar bij dijken ontbreekt en anderzijds omdat deze processen sterk situatieafhankelijk zijn. Steeds wordt aangegeven hoe grondkeuze het verouderingsmechanisme beïnvloedt en hoe het kan worden gemonitord.

4.5.1 Compactie

Compactie is de dichtheid van klei. Door bovenbelasting of eigen gewicht neemt de verdichtingsgraad van klei dieper dan 1 à 2 meter toe. Dit leidt tot compactie van dijksmateriaal (inklinking) en zakking van het maaiveld, maar ook tot een grotere sterkte en stijfheid van het kleipakket en een grotere erosiebestendigheid. Een te grote of een sterk geconcentreerde bovenbelasting leidt tijdelijk juist tot een lagere sterkte, omdat de structuur van klei dan wordt verbroken (verkneding).

Bij voor Nederlandse dijken gebruikelijke verdichting en gebruik van RAW-dijkenklei bedraagt de totale klink 4 à 8% van de dikte [16]. Dit betreft grotendeels klink. Verdichting na het aanbrengen van dijksmateriaal wordt voorkomen door deze grond al tijdens het aanbrengen laagsgewijs te verdichten. Klei met een voldoende laag watergehalte en organisch stofgehalte kan goed worden verdicht.

De mate van compactie wordt vastgesteld door hoogtemetingen. De factor die compactie bepaald wordt in-situ gemonitord met verdichtingsproeven met steekbussen en Proctorproeven [15]. Daarnaast kunnen de gevolgen van compactie (verhoogde sterkte en stijfheid) worden bepaald met triaxiaalproeven en samendrukkingsproeven. De mate van overconsolidatie van de grond, ofwel de verhoogde sterkte en stijfheid door belasting die in het verleden op de grond werkte, kan in samendrukkingsproeven worden afgeleid uit de grensspanning. Dit geeft echter voor grond in de onverzadigde zone, zoals de kleibekleding, geen relevante informatie voor de ontwikkeling van structuur en sterkte.

4.5.2 Verandering watergehalte

Het watergehalte in de klei verandert door weersomstandigheden en (grond)waterpeilveranderingen. In gestructureerde klei gaan deze veranderingen anders dan in massieve klei. De stijfheid en sterkte van de klei is sterk afhankelijk van de consistentie-index. Dit is het verschil tussen het aanwezige watergehalte en het watergehalte bij de uitrolgrens gedeeld door de plasticiteitsindex. De sterkte en stijfheid van klei nemen toe naarmate het watergehalte afneemt. Klei in dijken krijgt na aanleg een evenwichtswatergehalte dat fluctueert, afhankelijk van de diepteligging in de dijk.

Het evenwichtswatergehalte ligt meestal bij een consistentie-index van circa 0,7 in de buitenste meter van een dijklichaam. Als klei bij aanleg een watergehalte heeft van ongeveer 0,7, dan zijn krimp en zwel beperkt [14]. In de kern van de dijk ligt het evenwichtswatergehalte bij een consistentie-index van 0,6 à 0,7, in de dijkbekleding is dat 0,7 à 0,8 [58].

Door daling van het watergehalte als gevolg van verlagen van de relatieve luchtvochtigheid, neemt het volume van niet voldoende ontwaterde klei af en ontstaan maaiveldzakking en krimpscheuren die onder de bovenste 0.3 meter open blijven staan. Circa een derde van de volumeafname leidt tot zakking, circa twee derde van de

volumeafname leidt tot krimpscheuren. Bij verzadigde zware klei is de volumeafname van het water ongeveer gelijk aan de krimp. Bij verzadigde organische klei is de krimp minder, omdat ook sprake is van extra gasinsluiting [56]. Door dit krimpproces ontstaat een microstructuur, die tot een grotere sterkte leidt. Een herhaalde wisseling van watergehalte versterkt de rangschikking. Door het verhogen van de relatieve luchtvochtigheid zwelt klei weer enigszins en door de spanningen die daarbij ontstaan vormen zich, net als bij het krimpen, breuken. De herhaalde afwisseling van krimpen en zwellen bepaald voor een groot deel de resulterende bodemstructuur.

Een sterkte toename van water in zwelklei kan ook leiden tot scheuren, omdat de klei door de volumetoename omhoog kan worden gedrukt [53]. In Nederlandse dijken wordt dit echter zelden waargenomen, omdat grond hierin voldoende bewegingsvrijheid heeft en de fluctuaties in het watergehalte meestal voldoende worden beperkt. Bovendien komen in Nederland geen sterk zwellende kleisoorten voor, zoals in sommige andere landen worden aangetroffen.

In Nederland is klei met een hoog organisch stofgehalte in situ beneden de grondwaterstand meestal zeer nat en slap. Om zulke klei op een gewenst laag watergehalte te krijgen, is drogen aan de lucht nodig voor bijna alle toepassingen in de dijkenbouw. Het bereiken van een $I_c = 0.75$, waardoor verdere volume afname in de dijkbekleding beperkt blijft, kan meerdere jaren vergen [44].

Het watergehalte kan worden gemonitord door watergehaltemetingen op grondmonsters. Daarbij is het van belang dat de steekproef voldoende groot is. Daarnaast moet het watergehalte in klei worden gerelateerd aan de Atterbergse grenzen om de consistentie-index te kunnen bepalen [42].

4.5.3 Verandering zuigspanningen

Boven de freatische grondwaterstand is klei vaak onverzadigd of slechts deels met water verzadigd. De capillaire werking in de grond doet de sterkte van de klei toenemen. Dit wordt ook wel zuigspanning of negatieve waterspanning genoemd. Bij een lager watergehalte is de zuigspanning groter. In droge zomers is deze dan ook aanzienlijk hoger dan in natte winters. De zuigspanning varieert door neerslag, verdamping, grondwaterfluctuatie en wateropname door wortels. Deze variatie is aan het oppervlak hoger dan in de kern. Dit leidt tot zwel en krimp. Een verhoging van het watergehalte leidt tot zwel, een verlaging van het watergehalte tot krimp. Zwel en krimp zijn niet geheel omkeerbaar en hebben structuurvorming tot gevolg. Dit bepaalt, naast andere factoren, de bodemstructuur van grond [16].

De mate van zwel en krimp van klei bij een bepaalde watergehalteverandering wordt beïnvloed door het vermogen om watermoleculen te binden. Dit is afhankelijk van het lutumgehalte, de mineralogische samenstelling van de klei, de aard en geabsorbeerde stoffen aan het oppervlak van de vaste delen en stoffen die in het water zijn opgelost. De mineralogische samenstelling kan indirect worden herleid uit de activiteit van de klei, het quotiënt van de plasticiteitsindex en het lutumgehalte. Hoe hoger de activiteit, hoe meer zwel en krimp er optreedt [58]. De mineralogische samenstelling kan ook worden afgeleid met bijvoorbeeld met röntgendiffractie (XRD). Hoe hoger het gehalte aan smectietische mineralen, hoe hoger de mate van zwel en krimp [59]. En hoe hoger het zoutgehalte, hoe meer water kan worden opgenomen.

De zuigspanning wordt uitgedrukt in de logaritme van de meters waterkolom (pf-waarde). Dit kan men in-situ meten met een tensiometer.

4.5.4 Cementatie

Cementatie is de verbinding tussen kleideeltjes door chemische reacties tussen mineralen en neerslagen van minerale en organische stoffen aan het oppervlak van de kleideeltjes. Klei wordt hierdoor sterker. IJzer- en aluminiumverbindingen zijn belangrijke cementerende stoffen en ontstaan vaak bij blootstelling aan de lucht. Organische stoffen zijn meestal minder permanent en zijn vooral in het dynamische deel van de grond werkzaam (circa bovenste 1 m). De verbindingen zijn weinig flexibel en worden bij grote vervormingen weer verbroken [14].

Cementatie is niet per definitie gunstig, want het kan bij vervormingen leiden tot een abrupte sterkte-afname. Daarnaast kunnen cementerende stoffen als kalk onder bepaalde omstandigheden in water oplossen waardoor holtevorming en interne erosie kunnen ontstaan (zie paragraaf 4.5.13).

Het effect van cementatie wordt vaak indirect gemeten, bijvoorbeeld in sterkteproeven. Deze is gedefinieerd als de sterkte van verkneede klei, gedeeld door de sterkte van de onverstoorde klei [52].

4.5.5 Biologische activiteit

Biologische activiteit in dijken draagt bij aan structuurvorming in de grond. Structuurvorming is de verandering van de bodemstructuur, dit is de onderlinge rangschikking en samenhang van de vaste gronddeeltjes. Er kunnen meerdere activiteiten worden onderscheiden:

- Dieren zoals wormen, insecten, mollen en bevers graven in dijksmateriaal. Bij een verlaagde grondwaterstand door droogte nemen dierlijke graverijen toe [14].
- Onttrekking van water door begroeiing op dijken kan leiden tot een grotere variatie van het watergehalte in de grond. Dit geldt vooral bij bomen op dijken. Een grasmat dekt grond aan het oppervlak juist af waardoor extreme uitdroging kan worden beperkt in warme zomers [60].
- Wortels van planten leiden tot cementatie en houden gronddeeltjes in aggregaten bij elkaar [54].
- Begroeiing met een grasmat houdt in de substraatlaag een organisch stofgehalte in stand van 3 à 5% [14].
- Begroeiing kan leiden tot een af- of toename van nutriënten in de bodem, die op hun beurt weer invloed hebben op latere begroeiing [60].

De biologische activiteit kan worden beïnvloed door rekening te houden met de bodemvruchtbaarheid van de klei. Relevante factoren voor bodemvruchtbaarheid zijn:

- Chemisch aspecten (voedingsstoffen, mineralen, organische stof, waterbindend vermogen, zuurgraad).
- Fysische aspecten (waterbindend vermogen, poriëngehalte, korrelgrootteverdeling).
- Biologische aspecten (gezond bodemleven, behoud van locatiespecifieke zaden in de grond) [60].

Een grasmat kan zich lastig ontwikkelen in zware klei (ofwel klei met een hoog lutumgehalte), omdat de wortels niet goed in verdichte, fijnkorrelige samengestelde grond kunnen dringen. Bij het toepassen van zware klei als bekledingslaag moet daarom in eerste instantie rekening worden gehouden met een beperkte bescherming tegen structuurvorming door begroeiing. Zodra in zware klei structuur is gevormd, actief door eggen of passief doordat er een winter overheen gaat, kan een wortelmat zich beter ontwikkelen. Zoute klei beperkt de grasontwikkeling, omdat het de wateronttrekking door planten bemoeilijkt [57].

In de bodemrichtlijn [46] is beschreven hoe bodemmicrobiologische processen die voor het gezond functioneren van een bodem van belang zijn, kunnen worden gemeten. Er zijn zowel in-situ- als laboratoriummeetmethoden.

Indirect kan de biologische activiteit worden herleid uit een vegetatieanalyse van de grasmat. Hierbij wordt de vegetatiesamenstelling visueel vastgelegd als de vegetatiestructuur (samenstelling, bedekkingsgraad, hoogte, worteldiepte) [60].

4.5.6 Peptisatie en flocculatie

Bij peptisatie stoten kleideeltjes elkaar af en vormt klei een colloïdale suspensie (mengsel van kleine vaste delen en water) bij roeren, die na bezinking of afslippen slecht doorlatend is. Het proces treedt op bij afname van de ionenconcentratie in klei, bijvoorbeeld door toestroming van regenwater in zoute klei of door organische zuren uit planten. Bij flocculatie trekken kleideeltjes elkaar aan en vormt klei in water vlokken die sneller bezinken dan individuele kleideeltjes. Dit treedt op bij toename van de ionenconcentratie in klei, bijvoorbeeld door een verhoging van het kalk- of zoutgehalte [33].

Toepassing van klei met een voldoende laag kalk- en zoutgehalte beperkt extreme gedragsveranderingen door peptisatie en flocculatie [31]. Het zoutgehalte van klei is ook van belang voor met name vegetatie en eventueel uitspoeling bij het maaiveld.

Het vaststellen van de toestand van de grond kan met een onderzoek naar de chemische karakteristieken van het poriewater. Eventueel kan ook naar de kationenbezetting worden gekeken, met name de relatieve hoeveelheden geadsorbeerd Na^+ , vooral in relatie tot Ca^{2+} , Mg^{2+} . Dit kan door de *sodium absorption ratio* (SAR) en de *exchangeable sodium percentage* (ESP) te bepalen [33].

4.5.7 Oxidatie

Oxidatie is het proces waarbij organisch materiaal in de grond wordt afgebroken en ijzer en aluminium en andere stoffen een verbinding met zuurstof aangaan, met name door blootstelling aan de buitenlucht. Oxidatie van organisch materiaal leidt tot maaiveldzakking en mogelijk tot krimp-scheuren. Afbraak van organisch materiaal leidt tot afname van de vloeigrens en een toename van de sterkte en stijfheid [42]. Een iets te hoog organisch stofgehalte in klei in een dijkbekleding is na 3 tot 30 jaar (voor respectievelijk de bovenste 0.3 tot de bovenste 2 meter) grotendeels verdwenen door oxidatie. Bij organische klei in de dijk kern duurt dit proces 30 tot 70 jaar, afhankelijk van de grondwaterstand. Daarna blijft het organisch stofgehalte in evenwicht en heeft dan een waarde van circa 3% in de bovenste 1 tot 2 meter [26].

Organische stof verlies door oxidatie wordt beperkt door klei met een laag organisch stofgehalte toe te passen.

4.5.8 Vorst-dooiwisseling

Afwisselende perioden van vorst en dooi zorgen in de bovenste 30 centimeter van een kleilaag voor meer structuurvorming [60]. De onttrekking van water door kristallisatie van water bij ijsvorming en het daarna smelten heeft een bepaalde structuur van klei tot gevolg. Graafwerkzaamheden tijdens vorst zijn ongewenst. Als dit toch wordt gedaan, dan leidt de verhoging van het watergehalte in de toplaag door kristallisatieprocessen bij ijsvorming tot verkneding van klei met sterkte-afname tot gevolg. In zoute grond kunnen door vriesweer tijdelijk ongewenste zoutconcentraties ontstaan [57].

De nadelige effecten van zoute grond kunnen bij vorst significant worden [57]. Droge grond is minder gevoelig voor vorst dan natte grond.

Het optreden van vorst kan worden gevolgd door temperatuurmeting.

4.5.9 Rijping

Rijping is het proces waarbij slappe klei door blootstellen aan de lucht en droging wordt omgezet in stevige klei. Het is geen op zich zelf staand fenomeen, maar een verzamelterm van meerdere hiervoor genoemde processen [56]. Fysische rijping treedt als eerste op (in combinatie met oxidatie) en versterkt de grond door de afname van het watergehalte en toename van zuigspanningen (zolang de grond droog blijft). Als gevolg van oxidatie door krimp en gerelateerde spleetvorming vormt zich een prismatische structuur in de klei bij ontwateren, waardoor andere vormen van rijping op gang komen. Chemische rijping is versterking door grond door diverse reacties met zuurstof. Cementatie, door met name voortgaande oxidatie, valt hieronder. Biologische rijping is versterking door de onttrekking van vocht en omzetting van organische stof door planten en dieren. Rijping is in dijken voor een belangrijk deel een onomkeerbaar proces.

Gerijpte klei heeft een laag watergehalte en organisch stofgehalte. Van gerijpte klei kunnen stevigere dijken worden gemaakt, omdat deze sterker is en beter verwerkbaar dan ongerijpte klei. Bovendien verandert gerijpte klei na toepassing minder van toestand waardoor het ontstaan van wijde scheuren uitblijft.

De mate van rijping kan worden beschreven met de rijpingsgraad (n-factor) van Pons en Zonneveld [61]. De rijpingsgraad kan worden berekend uit het watergehalte, het organisch stofgehalte, het lutumgehalte, de zuigspanning en een coëfficiënt die afhankelijk is van het soort organisch materiaal [31]. In de jaren 80 is de

rijpingsgraad voor de dijkenpraktijk goeddeels vervangen door vergelijking van het watergehalte met de Atterbergse grenzen, ofwel de consistentie-index I_c , die het belangrijkste effect van rijping aangeeft.

Tabel 17 Rijpingsgraad van Pons en Zonneveld [61].

| 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 makkelijk tussen de vingers doorgeperst worden |
| 1,0 - 1,4 | Half gerijpt | Tamelijk slap, kleeft aan de handen en kan makkelijk tussen de vingers doorgeperst worden |
| 1,4 - 2,0 | Vrijwel ongerijpt | Slap, kleeft sterk aan de handen en kan zeer makkelijk tussen de vingers doorgeperst worden |
| > 2,0 | Ongerijpt | Zeer slap, loopt vrijwel tussen de vingers door |
| N-factor = (watergehalte - p*(100 - lutumgehalte - organische stofgehalte) / (Lutumgehalte + b* organische stofgehalte), waarbij p en b constanten zijn. | | |

De effecten van rijping kunnen in het laboratorium indicatief worden bepaald met een versnelde rijpingsproef. Daarbij wordt klei versneld gedroogd en regelmatig omgezet [40]. Een andere methode is een proef met versnelde simulatie van seizoenen in een klimaatkamer, zoals is toegepast bij het demonstratieproject Brede Groene Dijk. Hier wordt vooral het effect van droging bepaald. Het is niet mogelijk om alle relevante rijpingsprocessen versneld en op laboratoriumschaal na te bootsen.

4.5.10 Structuurvorming

De vorming van een bodemstructuur is de vorming van kluiten en scheuren in de grond. Dit wordt veroorzaakt door zwel en krimp, vorst en dooi, door rijping of uitdroging van te nat aangebrachte klei en door biologische activiteit. Deze structuur moet niet worden verward met de structuur van klei beschouwd op elementen kleiner dan 1 millimeter. De aanwezigheid van bodemstructuur in klei leidt tot een hogere doorlatendheid en lagere erosiebestendigheid. Daarnaast levert het minder weerstand tegen uitdroging en oxidatie van dieperliggende grondlagen. Daardoor is structuurvorming in zekere mate een zichzelf versterkend mechanisme. In Nederlandse dijken ontstaat in 5 à 20 jaar bodemstructuur tot circa 1,5 meter diepte [16]. Daaronder kan echter ook bodemstructuur voorkomen uit eerdere versterkingen in de historie van de dijk.

Ongewenste structuurvorming, zoals wijde spleten die bij zwellen niet meer sluiten, kan worden beperkt door klei niet te nat aan te brengen. De toepassing van zwelklei moet worden voorkomen, maar dit speelt in Nederland beperkt omdat sterk zwellende kleisoorten hier van nature niet voorkomen. Kleisoorten met een laag lutumgehalte en een laag organisch stofgehalte vormen een minder stevige en vaak wat fijnere bodemstructuur.

Knipklei is een kleisoort waarin een uitgesproken structuur is gevormd van verticale prisma's, die door dispersie vaak zijn aangetast, met wijde spleten. Het wordt gevormd uit een klei met een meestal relatief hoog organisch stofgehalte en met een, daaraan gerelateerd, hoog ijzersulfidegehalte, die vooral in de kustprovincies voorkomt [11]. Door oxidatie van de ijzersulfiden worden ijzer- en aluminium(hydro-) oxides gevormd en, met name, zwavelzuur (H_2SO_4). Hierdoor wordt de grond extreem zuur ($pH < 3$), wat leidt tot dispersie en waarbij zich lagen met gele, oranje en rode ijzerverkleuringen op de structuurelementen vormen.

De mate van structuurvorming wordt meestal vastgesteld met visuele waarnemingen in proefsleuven, waarbij de dikte van de gestructureerde laag en de intensiteit wordt vastgelegd. In "Studie voor richtlijnen klei op dijktafuds in het rivierengebied" [16] is een klasse-indeling gebruikt, in toenemende diepte, zie Tabel 18.

Tabel 18 Klasse-indeling structuurvorming volgens [16]

| Klasse | Zichtbare poriënruimte | Brokafmetingen |
|--------------------------------|------------------------|--------------------|
| Zodelaag | Niet gedefinieerd | Kruimelig |
| Open tot dicht grove structuur | 20 - 30% | 5 - 30 mm |
| Dichte grove structuur | 10 - 20% | 30 - 60 mm |
| Dichte structuur | 2 - 5% | 50 - 150 mm |
| Bijna-massieve structuur | < 1% | Verticale scheuren |

In de genoemde studie [16] staat tevens een methode waarmee de dichtheid van met zand gevulde scheuren in klei kan worden vastgesteld.



Foto 3 Voorbeelden van structuur in klei: Blija klei in Deltagoot (links [64]) en kleibekleding van de Kandiadijk (rechts, foto G.A.M. Kruse, 1981)

In Foto 3 zijn twee voorbeelden van structuur in kleibekledingen van dijken te zien. De foto links is van Blija klei in de Deltagoot. Hierin is de door de golfwerking uitgerepareerde bodemstructuur van de kleibekleding zichtbaar. De zeer duidelijke dominante verticale zuilenstructuur is het gevolg van te nat aanbrengen van de klei. De foto rechts is van de kleibekleding van de Kandiadijk langs de Nederrijn, circa vijf jaar na aanbrengen. De wijde verticale spleet in de klei behoort tot de dominante verticale prismatische structuur als gevolg van krimp van te nat aangebrachte klei. Deze spleten zwellen niet meer dicht, behalve tot 0,3 meter beneden maaiveld waar de structuur in de klei door wortels en graafactiviteit wordt gehomogeniseerd.

4.5.11 Verweking

Bij verweking ontstaan wateroverspanningen in de grond door trillingen, golfbelasting of een plotselinge toename van de effectieve spanning waardoor de korrelstructuur uiteenvalt. Daardoor nemen de sterkte en stijfheid van de grond significant af en kunnen deformaties ontstaan. Verweking treedt vooral op bij zand, maar ook bij zandige klei of losgepakte fijnkorrelige grond.

Het risico op verweking kan worden beperkt door klei toe te passen met een relatief hoog lutumgehalte. Bij een lutumgehalte groter dan 25% treedt geen verweking meer op [13]. In het buitenland wordt voor verwekingsanalyses bij bijvoorbeeld bouw van dammen uitgegaan van de vloeigrens van de grond. Keileem is gevoelig voor verweking, zie kader hierna.

De verwekingsgevoeligheid van klei kan worden gemeten met dynamische triaxiaalproeven of *california bearing ratio* (CBR)-proeven [62]. De bepaling van het lutumgehalte geeft indirect inzicht in de verwekingsgevoeligheid.

Nadelige invloeden op keileem

Keileem is grond die in de noordelijk helft van Nederland is afgezet in de voorlaatste ijstijd (het Saalien). De grond is vaak in dijken toegepast tijdens de Zuiderzeewerken en wordt in het Noordoosten van Nederland nog steeds als dijksmateriaal toegepast in regionale waterkeringen. Kenmerkend voor keileem is de hoge mate van overconsolidatie door voorbelasting door landijs. Ook karakteristiek is de aanwezigheid van veel kwarts en gesteentevormende mineralen en gesteenteresten met minder sterke onderlinge binding dan kleimineraal deeltjes. Typische verouderingsmechanismen bij keileem zijn:

- Keileem kan aanzienlijk minder sterk worden als zijn sterk verdichte structuur door verkneding teniet wordt gedaan.*
- Keileem is gevoelig voor verweking door trillingen en bovenbelasting. Hierdoor kan, door de compacte opbouw van dit materiaal, een waterspanningstoename ontstaan, die leidt tot structuurverlies.*
- Keileem kan aanzienlijk minder sterk worden door een toename van het watergehalte. Dit komt doordat het materiaal een relatief lage plasticiteitsindex heeft. Een kleine toename van het watergehalte zal daardoor leiden tot een grote afname van de consistentie-index.*

4.5.12 Erosie

Erosie is het loskomen en verplaatsen van gronddeeltjes of brokken grond door stromend water, door wind of door veranderingen van waterdruk bij golfbelasting. Alleen geleidelijke erosie wordt als verouderingsmechanisme beschouwd. Het uitgangspunt is namelijk dat incidentele extreme erosie van dijksmateriaal door golven of stroming wordt beperkt door een bekleding of dat het tijdens extreme omstandigheden wordt geaccepteerd, maar daarna direct wordt hersteld. Geleidelijke erosie is het oplossen van kleideeltjes in water (dispersie) of van stoffen als kalk. Dit kan bijvoorbeeld optreden wanneer relatief zoute klei wordt bespoeld met zoet water of wanneer de pH-waarde van de grond sterk verandert. Bespoeling kan langs het grondoppervlak optreden en ook door spleten in de grond (interne erosie) [57].

Erosiebestendige klei is minder gevoelig voor erosie [14]. Door klei toe te passen met een voldoende laag zoutgehalte, wordt erosie door dispersie beperkt. Interne erosie kan worden beperkt door een actieve klei toe te passen. Dit is een kleisoort met een plasticiteitsindex groter dan het lutumgehalte [32]. In [63] wordt uitgebreid ingegaan op de geotechnische factoren die erosie op de schaal van gronddeeltjes (zogenaamde slijterose) beïnvloeden.

De erosiegevoeligheid van de gronddeeltjes kan direct worden bepaald met kleinschalige erosieproeven of indirect door materiaalkundig onderzoek [38] waarbij een verband moet worden gelegd met de effecten van bodemstructuur.

4.5.13 Samenvatting verouderingsprocessen

Met het meenemen van veroudering bij het grondgestuurd ontwerpen van dijkversterking is nog maar weinig ervaring opgebouwd, omdat vaak wordt ontworpen op basis van de geldende eisen voor dijkklei. Als aan deze standardeisen wordt voldaan, dan zijn de effecten van veroudering doorgaan gering en al impliciet meegenomen.

Als wel met afwijkende grond wordt ontworpen, dan moeten verouderingsprocessen worden gekwantificeerd. Helaas is van veel relevante processen niet goed bekend hoe dit moet worden gedaan en is het complex om hier met behulp van fundamenteel onderzoek meer inzicht in te krijgen. Toch volgt hierna een generieke aanzet om de effecten van veroudering op courante classificatieparameters mee te nemen.

Eerst moet worden bepaald welke verouderingsprocessen er spelen. In Tabel 19 staat per afwijkende grondparameter vermeld met welke negatieve verouderingsmechanismen rekening moet worden gehouden. De achtergronden zijn elders in deze paragraaf en in bijlage 2 toegelicht.

Tabel 19 Invloed van afwijkende grondparameters (RAW-eisen) op verouderingsprocessen in klei

| Grondparameters | Verouderingsprocessen | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------|------------|------------------------|---------------------------|----------|---------------------|---------|------------------|-----------|--------|
| | Verdichting | Verandering watergehalte | Zuigspanningen | Cementatie | Biologische activiteit | Flocculatie en peptisatie | Oxidatie | Vorst-dooiwisseling | Rijping | Structuurvorming | Verweking | Erosie |
| Te lage plasticiteitsindex | | x | | | | | | | | | | x |
| Te hoge plasticiteitsindex | | | x | | x | | | x | x | x | | |
| Te lage vloeigrens | | | | | | | | | | | | x |
| Te hoog zandgehalte | | | | | | | | | | | x | x |
| Te laag organisch stofgehalte | | | | | x | | | | | | | |
| Te hoog organisch stofgehalte | x | | | x | | | x | | x | x | | x |
| Te hoog kalkgehalte | | | | x | | x | | | | | | x |
| Te hoog zoutgehalte | | | x | x | x | x | | x | | | | x |
| Te laag lutumgehalte | | | | | | | | | | | x | x |
| Te hoog lutumgehalte | | | x | | x | | | x | x | x | | |
| Verkleuringen/afwijkende geuren: | | | | | | | | | | | | |
| - blauw of grijs | x | x | | | | | | | | x | | |
| - bontgeel/bruinevlekt | | | | x | | | | | | x | | x |
| - rotte eierengeur | x | | | x | | | x | | | x | | |

De volgende stap is het beoordelen van de mogelijke nadelige effecten van de betreffende verouderingsprocessen op de constructieve eigenschappen van dijkonderdelen en de daaraan gerelateerde schade- en bezwijkmechanismen. Deze zijn in Tabel 20 samengevat.

Structuurvorming is een bijzonder verouderingsproces, omdat het ook een constructieve eigenschap is. Het staat daarom zowel horizontaal als verticaal in de tabel. Structuurvorming is een direct gevolg de meeste overige verouderingsprocessen. Daarnaast is het een zichzelf versterkend mechanisme: structuurvorming leidt tot meer structuurvorming.

Tabel 20 Invloed van verouderingsprocessen op constructieve eigenschappen van klei

| Constructieve eigenschappen | Verouderingsprocessen | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|--------------------------|----------------|------------|------------------------|---------------------------|----------|---------------------|---------|------------------|-----------|--------|
| | Verdichting | Verandering watergehalte | Zuigspanningen | Cementatie | Biologische activiteit | Flocculatie en peptisatie | Oxidatie | Vorst-dooiwisseling | Rijping | Structuurvorming | Verweking | Erosie |
| Structuurvorming (leidt tot vervolgemechanismen) | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | x |
| Doorlatendheid | | | | | | | | | | | | |
| - Micro-instabiliteit door hogere doorlatendheid | | | | | | | | | | x | | |
| - Macro-instabiliteit door hogere freatische lijn | | | | | | | | | | x | | |
| Erosiebestendigheid | | | | | | | | | | | | |
| - Versterkte erosie door scholvorming | | | | | | | | | | x | | |
| Vormvastheid | | | | | | | | | | | | |
| - Versnelde afbraak organisch materiaal | | | | | x | | x | | x | x | | |
| - Onvoldoende waakhoogte door scheuren in kruin | | | | | | | | | | x | | |
| - Onvoldoende waakhoogte door compactie | x | | | | | | x | | x | | | |
| - Interne erosie | | | | | x | | | | | x | | x |
| Verwerkbaarheid* | x | x | | x | x | x | | x | | | x | |
| Sterkte | | | | | | | | | | | | |
| - Micro-instabiliteit door vorming van schollen | | | | | | | | | | x | | |
| - Macro-instabiliteit door waterdruk in scheuren | | x | | | | | | | | x | | |
| - Macro-instabiliteit door afname zuigspanningen | | | x | | | | | | | | | |
| - Sterkteverlies door erosie | | | | | | | | | | | | x |
| - Sterkteverlies door verkneding | x | | | | | | | | | | x | |
| - Lagere sterkte door afname watergehalte | | x | | | | | | | | | | |
| Gewicht | | | | | | | | | | | | |
| - Micro-instabiliteit door afname gewicht deklaag | | x | | | | | | | | x | | |
| Begroeibaarheid | | | | | | | | | | | | |
| - Uitdroging grasmat | | x | x | | x | | | | | x | | |
| - Verminderde ontwikkeling grasmat | x | | | | x | x | x | | | | | |
| Verwekingsgevoeligheid | | | | | | | | | | | | |
| - Instabiliteit of afslag door verweking | | | | | | | | | | | x | |

* Verwerkbaarheid van bestaand dijkmateriaal (bijvoorbeeld tijdens dijkversterking of bouwwerkzaamheden)

Niet alle mogelijke bezwijk- of schademechanisme zijn relevant voor de dijkveiligheid. Sommige mechanismen kunnen door ontwerpmaatregelen worden vermeden. Als de dijk bijvoorbeeld hoog genoeg wordt ontworpen, dan zijn alle aan overslag gerelateerde mechanismen (onvoldoende waakhoogte door structuurvorming in bovenkant kruin, erosie van schollen op het binnentalud) niet meer relevant. Overige mechanismen moeten wel nader worden bekeken. Dat kan door het effect met rekenmodellen proberen te kwantificeren. Als onderbouwing kunnen specialistische proeven worden toegepast (zie paragraaf 3.5.5 en 4.5).

Voorbeelden kwantificering veroudering

- *Het rijpingsproces van natte klei uit baggerspecie duurt meestal 1 à 2 jaar. Pas dan is te zien hoe geschikt de grond is voor dijkversterkingen. Bij het demonstratieproject **Brede Groene Dijk** is de natte klei versneld gerijpt in een klimaatkamer. Dat gaf in een vroeg stadium globaal inzicht in de verbeterde eigenschappen na rijping.*
- *Het is bekend dat het organisch stofgehalte van klei na oxidatie een evenwichtswaarde bereikt van 3% in de bovenste circa 1 meter onder een grasmatt. Op basis daarvan is bij het **Ruimte voor de Rivier-project IJsseldelta** de volumeafname indicatief berekend van kleisoorten met een hoog organisch stofgehalte. In het ontwerp is hiervoor gecompenseerd door iets grotere laagdiktes toe te passen.*
- *Bij **dijken in Ooijen en Westervoort** is het verloop van zuigspanningen door het jaar heen als gevolg van seizoensvariaties gemeten met tensiometers. Daaruit blijkt dat met name in de zomer relatief hoge zuigspanningen aanwezig zijn waardoor de schuifsterkte van het dijksmateriaal groter is dan standaard in berekeningen wordt aangenomen.*



5 Het toepassen van gebiedseigen grond in ontwerp, uitvoering en beheer

5.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 bespraken we de functionele toepassing van grond in dijken. In dit hoofdstuk komen de andere mogelijkheden aan bod om onderbouwd af te wijken van de eisen, inclusief voorbeelden. Als eerste lichten we toe hoe je ruimte kunt zoeken in het ontwerp. Daarna volgt het opwaarderen van grond. Tot slot staan we stil bij een ander beheer- en onderhoud, inclusief de uitgangstoets die de beheerder kan uitvoeren bij het opleveren van de dijkversterking. Voor alle mogelijkheden moet aangetoond worden dat aan de vereiste veiligheid wordt voldaan. We gaan daarom eerst dieper in op de aantoonbaarheid van een grondgestuurd ontwerp.

5.2 Aantoonbaarheid

Bij grondgestuurd ontwerpen is de aantoonbaarheid een belangrijk onderdeel van het ontwerpproces. De volgende paragrafen beschrijven de aanpak hiervoor.

5.2.1 Proces naar een gevalideerd ontwerp

Eisen voor een grondgestuurd ontwerp zijn niet vastgelegd in richtlijnen. Het is daarom van groot belang dat het proces naar een gevalideerd ontwerp in de verschillende ontwerpfasen duidelijk is en dat de juiste partijen betrokken worden. Tabel 21 geeft een voorbeeld van een verificatieproces in de verschillende ontwerpstappen.

Tabel 21 Voorbeeld verificatieperspectief voor aantoonbaarheid bij grondgestuurd ontwerpen

| Fase | Centrale vraag | Wat moet zijn aangetoond? | Betrokken partijen |
|---|---|---|--|
| Verkenning (VKA) | <ul style="list-style-type: none"> Is een grondgestuurd ontwerp het voorkeursalternatief (VKA)? | <ul style="list-style-type: none"> Onderbouwing voor het antwoord op de vraag of een grondgestuurd ontwerp het VKA is Het VKA is haalbaar, al zijn mogelijk beheersmaatregelen nodig bij tegenvallende resultaten van vervolgonderzoek Er is een onderzoeksstrategie die in latere fase de betrouwbaarheid van oplossing kan aantonen, al dan niet met inzet van beheersmaatregelen. Het onderzoeksplan past binnen projectrandvoorwaarden | <ul style="list-style-type: none"> Ontwerper Specialist Beheerder waterkering Gebiedspartner Toetsende autoriteit: Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT), evt. bijgestaan door onafhankelijk toetsers of adviesorgaan zoals Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) of Adviesteam Dijkontwerp |
| Planuitwerking (projectplan) | <ul style="list-style-type: none"> Hoe worden ontwerp-eigenschappen van de gebiedseigen grond aangetoond? Wat zijn beheersmaatregelen (terugvalopties)? | <ul style="list-style-type: none"> Op basis van onderzoek is er voldoende vertrouwen in betrouwbaarheid van ontwerp Beheersmaatregelen voor mogelijke tegenvallers zijn uitgewerkt en inpasbaar Er is een verificatieplan voor de uitvoering | <ul style="list-style-type: none"> Ontwerper Specialist Beheerder waterkering Gebiedspartner Toetsende autoriteit: onafhankelijk specialist of adviesorgaan, zoals ENW of Adviesteam Dijkontwerp |
| Realisatiefase (opleveren veilige dijk) | <ul style="list-style-type: none"> Voldoet het op te leveren werk aan de eisen uit het verificatieplan? Zijn beheersmaatregelen ingezet waar nodig? | <ul style="list-style-type: none"> Het verificatieplan is toegepast en resultaten zijn beschreven in het opleverdossier (verificatierapport en keuringsdocumenten) Er is een concept beheer- en onderhoudsplan | <ul style="list-style-type: none"> Bouwer Ontwerper Beheerder waterkering Gebiedspartner |

| Fase | Centrale vraag | Wat moet zijn aangetoond? | Betrokken partijen |
|---------------------|--|--|--|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • Er zijn afspraken over nazorg | <ul style="list-style-type: none"> • Specialist (bij afwijkingen) of andere toetsende autoriteit |
| Beheer (zorgplicht) | <ul style="list-style-type: none"> • Voldoet de dijk aan wensen van beheer en aan de waterveiligheidseisen tijdens de levensduur? | <ul style="list-style-type: none"> • Monitoringsplan van prestatie en verouderingsgedrag is operationeel • Er is voorzien in beheersmaatregelen bij afwijkend gedrag • Periodieke beoordeling kan worden uitgevoerd | <ul style="list-style-type: none"> • Beheerder • Specialist • Bouwer en ontwerper tijdens nazorgperiode |

5.2.2 Onderzoeksplan en verificatieplan opstellen

In de verkenningsfase ligt de nadruk op het vaststellen van een haalbaar voorkeursalternatief (VKA). Als het VKA een grondgestuurd ontwerp is met grond die niet aan standaardspecificaties voldoet, dan moet de haalbaarheid nog worden aangetoond. Het opstellen van een onderzoeksplan, inclusief mogelijke beheersmaatregelen bij tegenvallers is onderdeel van deze fase.

Is de haalbaarheid aangetoond, dan kan een gedetailleerd verificatieplan worden opgesteld. Het doel hiervan is om in de realisatiefase te toetsen of het werk ook naar behoren is uitgevoerd. Een verificatieplan omvat een controlesystematiek, *non performance*-criteria en beslisschema's voor beheersmaatregelen. Het opzetten van het verificatieplan is maatwerk.

Hierna worden verschillende aandachtspunten toegelicht voor het opzetten van een onderzoeks- en verificatieplan.

5.2.3 Aantoonbaarheid bulkgedrag en op grote schaal testen

Soms is het effect van een bepaalde bijmenging op het bulkgedrag onduidelijk. Standaardeisen zijn dan niet toegesneden op een dergelijk afwijkend materiaal, waardoor er ook geen duidelijke afkeurgrens is. Een voorbeeld is het effect van rietstengels op het bulkgedrag van klei, zie onderstaande voorbeeld.

Voorbeeld belang van bulkgedrag: klei met rietstengels

Waterschap Noorderzijlvest wil een partij klei toepassen in een dijkversterking. Op basis van het organische stofgehalte dat bepaald is, voldoet de klei. Uit een visuele beoordeling wordt duidelijk dat de partij klei ook rietstengels bevat. De effecten van deze bijmenging van rietstengels op functionele eisen zoals doorlatendheid en sterkte zijn onduidelijk. Om de partij grond daadwerkelijk toe te kunnen passen, is het noodzakelijk om grote schaalproeven uit te voeren, zodat het effect kan worden vastgesteld.

Het optuigen van een verificatieprogramma voor testen op functionele eisen vergt extra tijd. Dit kan betekenen dat aanvullende laboratorium- en veldproeven nodig zijn. Soms zijn zelfs proefterpen nodig of grootschalige systeemtesten. Voorbeelden van grootschalige systeemtesten zijn stroomgootproeven, kantelgootproeven, golfbelastingproeven of overslagsimulatieproeven. Een projectvoorbeeld van verificatie van erosiebestendigheid van gebiedseigen grond is beschreven in bijlage 3 "Verificatiemethode grondgestuurd ontwerpen Ooijen-Wanssum". Bij Ooijen-Wanssum zijn de testen in de planuitwerkingsfase uitgevoerd, maar idealiter wordt voor dergelijke testen al aan het begin van het ontwerpproces tijd gereserveerd. Dit is lastig bij een normale projectdoorlooptijd en -fasering omdat aan het begin van het project de voorkeursvariant en de versterkingstechniek nog niet in beeld zijn.

Soms wordt ontworpen met een grondsoort die al eerder in een ander project is onderzocht op dezelfde constructieve eigenschappen en ontwerpaspecten en waarbij het verificatieproces met succes is doorlopen. In dat

geval volstaat het om de vergelijkbaarheid van grondeigenschappen (aard- en gedragseigenschappen) van deze grond aan te tonen. Ook moet de grond op een vergelijkbare manier worden aangebracht (realisatie vergelijkbare toestandsparameters).

De laatste jaren worden dijkversterkingsprojecten grootschaliger: van enkele kilometers naar tientallen kilometers. Juist de steeds grotere schaal leent zich voor maatwerk als het gaat om projectspecifieke materiaalspecificaties of het onderzoek naar functionele eigenschappen van de gebiedseigen grond. Een andere trend is het vroegtijdig betrekken van aannemers in het ontwerpproces. Vroegtijdige samenwerking van ontwerpers en bouwers maakt het mogelijk om grootschalige grondmechanische gedragstesten uit te voeren binnen een project. Dit wordt gestimuleerd als de projecten de tijd en middelen krijgen om dergelijke testprogramma's uit te voeren. Denk bijvoorbeeld aan het aanbrengen van één of meerdere proefterpen om het gedrag van grond op ware schaal te onderzoeken. Het is daarom verstandig om tijd in te ramen voor grootschalige proeven, zonder dat technieken al gekozen of uitgewerkt zijn.

5.2.4 Aantoonbaarheid langetermijngedrag

Verwachte langetermijneffecten kunnen een rol spelen bij overwegingen om materiaal met sterke bijmenging niet toe te passen. Denk hierbij aan het toepassen van materialen die erg krimpgevoelig zijn. Bodemstructuurvorming is een langdurig proces dat wel tien jaar in beslag kan nemen. Het toetsen van eisen op korte termijn biedt dan nog onvoldoende garantie. Denk hierbij aan het meten van de doorlatendheid van klei direct na aanleg. Over de jaren neemt de doorlatendheid door structuurvorming verder af. In de verificatie moet daarom aandacht zijn voor aantoonbaarheid op langere termijn. In hoofdstuk 4 staan voorbeelden van verouderingsprocessen. Goed kijken naar het gedrag van dijken in de omgeving die uit hetzelfde materiaal zijn opgebouwd levert veel informatie op over het verouderingsgedrag. Ook het uitvoeren van proeven levert deze informatie op. In het demonstratieproject Brede Groene Dijk bijvoorbeeld wordt veroudering van zout en organisch gerijpt slib uit de Eems Dollard gemonitord en wordt kunstmatige veroudering in klimaatkamers onderzocht.

5.2.5 Acceptatie vanuit beheer en onderhoud

Vanuit beheer en onderhoud moet een ontwerp van een dijk aan alle eisen voldoen. Bij het toetsen van een dijk aan de waterveiligheidseisen wordt hier soepeler mee omgegaan, bijvoorbeeld door het toepassen van de restprofielbenadering. Achterliggende gedachte hierbij is om te onderzoeken of het falen van een dijk een waterveiligheidsprobleem is, of dat er alleen een probleem is omdat de dijk is afgeschoven. Ook in het ontwerp kan gebruik worden gemaakt van de restprofielbenadering. Het toepassen van restprofielbenaderingen maakt het mogelijk om klassieke, hoogwaardige materialen met beperkte afmetingen uit te wisselen tegen minder hoogwaardige materialen met grotere dimensies. Vanuit waterveiligheid kan dit een zeer valide onderbouwing zijn, maar vanuit beheer mogelijk onwenselijk. De impact van het toepassen van restprofielbenaderingen op het (dagelijks) beheer en onderhoud van de dijk moet onderzocht worden. In dit onderzoek is afstemming tussen ontwerper en beheerder essentieel.

De laatste jaren doen beheerders en onderzoekers steeds meer kennis op over het werkelijk gedrag en schade aan dijken. Het is raadzaam om deze kennis ook bij het formuleren van functionele eisen te betrekken. De juiste informatievoorziening vanuit de techniek naar omgeving, beheerder en toetsers over de consequenties van een ontwerpkeuze zoals restprofielbenadering, is van groot belang om onzekerheden en terughoudendheid weg te nemen.

5.3 Ruimte zoeken in het ontwerp

Naast nuanceren van functionele eisen is het ook mogelijk om anders te ontwerpen waardoor functionele eisen minder relevant zijn. Dit is grondgestuurd ontwerpen op basis van beschikbare **eigenschappen** van de grond in plaats van ontwerpen via een klassieke Piramide van **Eisen**, zie Figuur 6 en Figuur 12.

5.3.1 Verschillende ontwerpkeuzen

In de praktijk blijkt dat de mogelijkheden voor het toepassen van gebiedseigen grond met afwijkende eigenschappen groot zijn als er ruimte is in het ontwerp. Het begrip 'ruimte' gaat in dit geval over enerzijds fysieke ruimte en anderzijds ruimte in tijd. Vaak hangen beide ook weer samen en is het zaak om hiervoor vroegtijdig samen met gebiedspartners op te trekken (zie paragraaf 2.4.1).

Hierna volgen voorbeelden van verschillende mogelijkheden om een ontwerp passend te maken voor gebiedseigen grond.

5.3.2 Dijkgeometrie aanpassen

In dit geval wordt de geometrie van de dijk zo ontworpen dat de afwijkende eigenschappen niet meer relevant zijn. Denk hierbij aan aanpassing gericht op belastingreductie of op het vergroten van sterkte.

Een heel duidelijk voorbeeld van het aanpassen van de dijkgeometrie is het verschil tussen de typische geometrie van een zeedijk en een rivierdijk. Zeedijken hebben vanwege de relatief zware hydraulische belasting vaak een flauw buitenbeloop. Bij een rivierdijk, waar het langdurende hoogwater vaak voor hogere waterdrukken in diepere lagen kan zorgen, is het binnenbeloop vaak robuuster vormgegeven dan het buitenbeloop vanwege stabiliteits- en pipingbermen.

Voorbeelden taludaanpassingen

*In het demonstratieproject **Brede Groene Dijk** (Waterschap Hunze en Aa's) wordt in Noord-Groningen gerijpte baggerspecie uit de Eems-Dollard toegepast in de buitenbekleding van deze groene zeedijk. De dijk heeft geen harde bekleding en wordt daarom aangelegd onder een flauw buitentalud van 1:7. Dit is een flinke stap ten opzichte van een klassieke zeedijk met harde bekleding. De gerijpte baggerspecie heeft een zout- en organische stofgehalte dat hoger is dan de standardeisen voor een bekledingsklei. De erosiebestendigheid van deze grond en bekleding wordt met full scale-onderzoek in de Deltagoot getest.*

*In het project **Hellegat** (bij Terneuzen, 1970) is een flauw buitentalud (1:7) gemaakt van schorklei. Schorklei is meestal erosiebestendiger. Omdat het talud flauw genoeg is en het voorland ruim boven de hoogwaterlijn ligt, is geen steenbekleding (glooiing) meer nodig. De schorklei moest voor toepassing wel eerst circa 1,5 jaar rijpen (of drogen). De dijk ligt hier in een natuurgebied, waardoor de wens was om de dijk zo natuurlijk mogelijke aan te leggen.*

Het toepassen van extra materiaal of een erosiebufferzone op de vooroever (opofferingszone) wordt op verschillende plekken in Nederland toegepast. Voorbeelden zijn het Zwin in Zeeland en langs de Maas bij Dijkversterking Ooijen-Wanssum. In beide gevallen ligt de waterkering verholten in een groter grondlichaam, waardoor een natuurlijke opname in het landschap ontstaat.

Voorbeelden opofferingszone als beschermende laag en/of voor belastingreductie

*Het natuurgebied **het Zwin** in Zeeland is vergroot door landbouwgebied op te geven. Het vrijgekomen materiaal is gebruikt om robuuste dijken te bouwen. De nieuwe dijken hebben een kern van zand met dikke kleilagen aan de buitenzijde met schorren ervoor. De dijken krijgen op die manier een doorgaande natuurlijk begroeiing, terwijl de veiligheid 'verborgen' is aangelegd en tevens uitdroging wordt tegengegaan. In een gedeelte van de dijkversterking is om die reden gebiedseigen (zoute) schorklei gebruikt.*

*In het project **Dijkversterking Ooijen-Wanssum** is een erosiebuffer toegepast, opgebouwd uit gebiedseigen grond. Deze buffer zorgt voor een erosiebescherming voor het dijklichaam en is een alternatief voor een klassieke taludbekleding van stevige erosiebestendige klei. Het erosiegedrag van de gebiedseigen grond is uitvoerig onderzocht, onder andere in een kantelgoot. Met deze oplossing wordt geanticipeerd op de onzekerheid rond langetermijneffecten door het gedrag in de tijd, na een hoogwater belasting, te monitoren en daar waar nodig herstelwerkzaamheden toe te passen. Inmiddels heeft de erosiebuffer ook al de eerste 'stresstest' ondergaan: bij het zomerhoogwater van 2021 heeft de buffer*

goed gefunctioneerd. Inspectie van de staat van de bufferzone en monitoring van de invloed van veroudering op de erosiebestendigheid is geïntegreerd in het beheer. In bijlage 3 "Verificatiemethode grondgestuurd ontwerpen Ooijen-Wanssum" is deze case meer uitgebreid beschreven.

Een recente tendens is om grotere overslagdebieten toe te staan in het rivierengebied om zo de hoogte-opgave te beperken. Het binnenbeloop van dijken wordt hierdoor zwaarder belast en dit is niet het uitgangspunt geweest bij een conventionele ontwerp van de binnenbekleding. Een logisch gevolg is dat er hogere eisen worden gesteld aan de dikte en materiaaleigenschappen van de binnenbekleding en/of drainagesystemen. De kansen voor gebiedseigen grond nemen hierdoor af in veel gebieden, vooral in het bovenrivierengebied.

Voorbeeld belastingreductie door kruinhoogteaanpassing

Voor de Dijkversterking Neder-Betuwe (Waterschap Rivierenland) worden de dijken rond de Gouveneurspolder met een aangepaste kruinhoogte aangelegd. Hierdoor zijn overslaggerelateerde vervolgmechanismen niet meer ontwerpbepalend en kan de dijkversterking met gebiedseigen materiaal worden gerealiseerd.

Een voorbeeld van het robuuster dimensioneren van een functioneel onderdeel ter compensatie van afwijkende eigenschappen, is de situatie bij het project Reevediepdijken.

Voorbeeld dikke berm ter compensatie van lichter materiaal

Bij het project Reevediepdijken (Waterschap Drents Overijsselse Delta) is voor de berm gekozen voor het versoepelen van de eis aan het organische stofgehalte (van maximaal 5% m/m volgens RAW 2015 naar 6 of 7% m/m). Dit is na consultatie van het Expertise Netwerk Waterveiligheid, Techniek (ENW-T) besloten. Het toepassen van lichtere materialen met afwijkend hoog organische stofgehalte (> 5%) resulteert in een groter materiaalvolume om het vereiste bermgewicht te bereiken. Bij het toestaan van afwijkende eigenschappen, in dit geval een hoger organisch stofgehalte dan de gebruikelijke bovengrens van 5% m/m, moet ook nagedacht worden over het effect van verouderingsmechanismen, zoals het effect van structuurvorming en droogte.

5.3.3 Materiaalkeuze aanpassen

Bij het vaststellen van het principeontwerp aan het begin van de ontwerptrechter ontstaan of vervallen soms onbewust mogelijkheden voor toepassing van gebiedseigen grond. Het is daarom van groot belang om vooral bij de eerste stappen in het ontwerpproces bewust na te denken over ontwerpkeuzen, zoals: welk kernmateriaal wordt toegepast?

Het te lang openhouden van de keuze tussen een klei- of zandkern is erg onpraktisch tijdens de verdere uitwerking van het ontwerp. Juist bij dergelijke principiële keuzen worden kansen en beperkingen van gebiedseigen grond bepaald. Te vroeg kiezen legt dus mogelijk onnodige beperkingen op voor gebruik van gebiedseigen grond. Maar te laat kiezen betekent te weinig tijd voor verdiepend onderzoek naar eigenschappen van de gebiedseigen grond en het detailleren van het ontwerp wordt erg onpraktisch. Aan het eind van de planuitwerkingsfase liggen de vorm van de dijk en het bijbehorende ruimtebeslag vast en wordt een switch in materiaalkeuze erg lastig.

Langetermijneffecten bij samenspel bekleding en kernmateriaal

Bij de keuze van het kernmateriaal en de bekleding wordt sterk aanbevolen om rekening te houden met verouderingseffecten. Uit consultatie van diverse zeer ervaren bodemdeskundigen door de POV-DGG is een duidelijk beeld naar voren gekomen dat dijken met een kleikern op langere termijn meer robuustheid bezitten tegen verouderingseffecten zoals structuurvorming dan dijken met een zandkern. Een dijk met een kleikern heeft bijvoorbeeld een groter incasseringsvermogen tegen langdurige droogte dan een dijk met een zandkern vanwege het remmend effect van uitdroging van de bekleding en daarmee de geringere beïnvloeding van de kwaliteit van de grasmat. Het samenspel van bekleding en kern verdient volgens de

POV-DGG meer aandacht dan nu in technische leidraden wordt geboden, zeker met het oog op klimaatverandering.

Bij het opstellen van een principe-ontwerp ligt de focus vooral op de hoofdgrondsoorten, zoals beschikbaar zand, silt of klei. Tabel 22 noemt enkele kenmerkende eigenschappen van klei en zand de levenscyclus van de dijk.

Tabel 22 Kenmerkende constructieve gedragseigenschappen klei en zand tijdens de levenscyclus van de dijk

| Fase | Zand | Klei |
|---------------|--|---|
| Vooronderzoek | + Geschiktheid is eenvoudig te bepalen uit korrelverdeling en dichtheid + Vaak beter beschikbaar | - Geschiktheid is afhankelijk van vochtgehalte dat verandert na winning - Materiaal is vaak heterogeen |
| Ontwerp | + Drainerende functie - Gevolg voor erosie/ geen reststerkte + Geotechnische parameters zijn voorspelbaar | + Waterdicht behalve als er een goed ontwikkelde bodemstructuur is + Erosiebestendig/zorgt voor reststerkte - Geotechnische parameters zijn afhankelijk van o.a. watergehalte en bodemstructuur |
| Uitvoering | + Kan eenvoudig worden verwerkt en verdicht - Kan onder water alleen onder een flauw talud worden aangebracht | - Verwerkingsmogelijkheden van te natte klei zijn beperkt - Kan onder water nauwelijks worden verdicht |
| Beheer | - Losgepakt zand is gevoelig voor verwerking - Ongewenste waterophopingen kunnen ontstaan - Piping kan optreden - Geen graszode | - Door weersinvloeden ontstaat bodemstructuur in de buitenste 1-2m. + Goed substraat voor grasvegetatie + stabiele geometrie aan oppervlak |
| Ontmanteling | - Bij ontgraven kan 'loopzand' ontstaan | - Is gevoelig voor verkneding bij ontgraving |
| + Voordeel | | |
| - Nadeel | | |

Tabel 23 geeft een globaal idee van de functionele eigenschappen per grondsoort. Dit kan behulpzaam zijn bij het verkennen van kansen voor beschikbare gebiedseigen grond aan het begin van de ontwerptrechter.

Tabel 23 Constructieve gedragseigenschappen per grondsoort

| | Grof | | | | Fijn | | | | | Organisch |
|--------------------------------|--------|----------------------|-------------------|----------|----------------|------------|----------------------|------------------|--------------|-----------|
| | Grind | Grof/gegradeerd zand | Fijn/uniform zand | Keileem | Leem/silt | Kleig zand | Zandige/schrale klei | Zware/vette klei | Humeuze klei | Veen |
| Bestand tegen structuurvorming | ++ | ++ | -- | + | - | 0 | - | -- | -- | -- |
| Waterdoorlatend | -- | -- | - | - | - | 0 | + | ++ | + | + |
| Erosiebestendig | - | -- | -- | -- | - | 0 | + | ++ | 0 | - |
| Vormvast | ++ | ++ | - | - | - | + | + | + | + | -- |
| Verwerkbaar | ++ | + | - | - | - | -- | - | - | - | -- |
| Sterk | ++ | ++ | - | - | - | + | + | + | - | -- |
| Zwaar | ++ | ++ | - | ++ | -- | + | + | + | - | -- |
| Begroeibaar | -- | - | - | -- | -- | ++ | ++ | + | ++ | + |
| Verwekingsongevoelig | 0 | - | -- | -- | 0 | + | ++ | ++ | ++ | + |
| Toelichting | | | | | | | | | | |
| ++ zeer goed | + goed | 0 neutraal | | - slecht | -- zeer slecht | | | | | |

We schreven al dat structuurvorming een belangrijke, nadelige invloed heeft op doorlatendheid en erosiebestendigheid van klei (behalve voor slijterose) (zie paragraaf 4.5.11). Deze structuurvorming neemt met de diepte af en is bij een correct uitgevoerde dijkversterking (met het juiste watergehalte en verdichting) op een diepte van circa 1,5 meter onder maaiveld meestal niet meer noemenswaard. Het is van belang om met kennis van de bodemkunde na te gaan of de structuurvorming onomkeerbaar is: hoe snel herstellen krimpscheuren zich weer bij het toenemen van het vochtgehalte tijdens hoogwater. Wanneer erosiebestendigheid en een stevige zode belangrijk zijn, is het een overweging om een relatief dikke laag goed verdichte gebiedseigen schralere klei met een laag lutumgehalte toe te passen. De bulkdoorlatendheid in de bovenste 0,8 meter is niet afhankelijk van de mate van fijnkorreligheid (lutem-zandgehaltes). Deze gedachtegang wordt bijvoorbeeld bij Ooijen-Wanssum toegepast.

Voorbeelden aanpassingen bij afwijkende materiaaleigenschappen

*Binnen het project **Ooijen-Wanssum** (Waterschap Limburg) is onder de kern van de dijk een **diepe kleikist** toegepast. De belangrijkste constructieve gedragseigenschap van de kleikist is een lage doorlatendheid om voldoende waterremmend te zijn. De kleikist kon worden gerealiseerd met gebiedseigen klei met een relatief laag lutumgehalte. Door de klei goed te verdichten en de kleikist voldoende breed te maken, kon aantoonbaar aan de functionele eis worden voldaan. Doordat de kist diep onder de dijk zit, zal het effect van structuurvorming gering zijn zodat ook een duurzame oplossing is gerealiseerd. In bijlage 3 “Verificatiemethode grondgestuurd ontwerpen Ooijen-Wanssum” staat een samenvatting van dit project.*

*Voor de **Dijkversterking Gorinchem - Waardenburg** (Waterschap Rivierenland) worden **drainerende en waterremmende lagen** toegepast. In het project is voor diverse onderdelen van de dijk, zoals de substraatlaag, een drainage-bed, de kern en bekledingslagen, gebruikgemaakt van de gebiedseigen grond die vrijkomt uit uiterwaardvergraving en het verleggen van de dijk. De dimensies van deze dijkonderdelen zijn afgestemd op de eigenschappen van de bestaande dijk en de gebiedseigen grond. Bij het bepalen van de afmetingen van de bekledingslagen heeft het samenspel tussen kleikern en kleibekleding bijzondere aandacht gehad. Op die locaties waar gekozen is voor een zandkern, is een aanzienlijk dikkere bekleding toegepast dan op de locaties met een kleikern. Hieraan lagen de overwegingen ten aanzien van het incasseringsvermogen ten grondslag, zie het eerdere kader “Langetermijneffecten bij samenspel bekleding en kernmateriaal,.*

Een interessant voorbeeld van optimale afstemming van de eigenschappen van gebiedseigen materiaal op de functies van de waterkering speelt in het dijkvak Maurik-Rijswijk in de Betuwe.

Voorbeeld uitwisseling gebiedseigen gronden binnen het dijkvak

*In **dijktraject Maurik - Rijswijk** is specie-uitwisseling in het plangebied toegepast. De specie-uitwisseling was een oplossing om het pipingprobleem aan te pakken. In plaats van binnendijs een pipingberm aan te leggen, is buitendijs het voorland waterdicht gemaakt en daarmee is de kwelweglengte vergroot. De klei in de binnenberm is afgegraven en vervangen door zand of zandige klei van buitendijs. Om de klei-inkassing in het voorland goede waterremmende eigenschappen te geven, is de aangebrachte laag klei afgedekt met een laag teelaarde. Deze afdeklaag had als functie om structuurvorming van de onderliggende kleilaag te remmen. Deze werkwijze was een alternatief voor materiaal van elders aanvoeren.*

Het aantonen dat het bestaande bekledings- of kernmateriaal niet hoeft te worden afgegraven, is de ultieme vorm van het toepassen van gebiedseigen grond. Het devies is: gewoon laten zitten. Hier is ook een link met inspectie en monitoren, zie paragraaf 5.5.

5.3.4 Ontwerp gebiedsontwikkeling aanpassen

Er zijn ook voorbeelden waarin het ontwerp van het gehele gebied wordt aangepast aan de beschikbare gebiedseigen grond.

Voorbeeld aanpassen ontwerp gebiedsontwikkeling

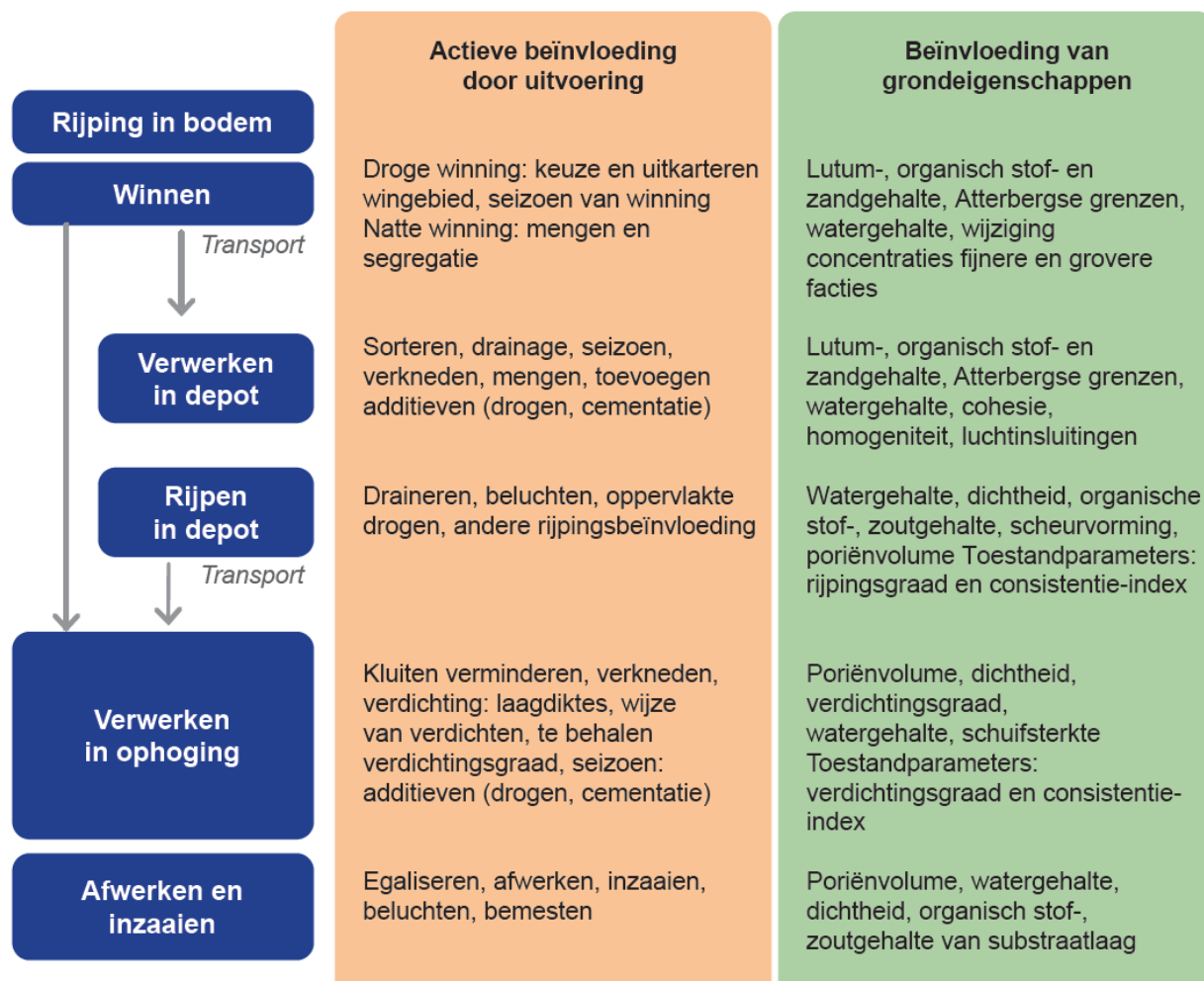
Voor de dijkversterking van de Grebbedijk (Waterschap Vallei en Veluwe) is bijvoorbeeld de ligging van de nevengeul aangepast aan de lokaal beschikbare grond. Het bleek dat in een deel van het gebied grond aanwezig was die voldeed aan de standardeisen. Door de aanpassing van de ligging van de nevengeul kon de vergraving worden gecombineerd met hoogwaardige kleiwinning zonder dat de waterveiligheid daardoor werd bedreigd.

5.4 Opwaarderen grond door wijze van grondbewerking

Door keuzes te maken in de wijze van uitvoering, kunnen grondeigenschappen beïnvloed worden en kan grond daardoor opgewaardeerd worden. We lichten eerst verschillende manieren van beïnvloeden van de constructieve eigenschappen toe, gevolgd door voorbeelden hoe grond opgewaardeerd kan worden in de verschillende fasen van het grondwerk met klei. Daarna geven we aan welke keuzes mogelijk zijn.

5.4.1 Beïnvloeden constructieve eigenschappen door wijze van uitvoering

We hebben eerder beschreven hoe de eisen aan constructieve gedragseigenschappen van een dijkonderdeel voor een groot deel afhankelijk zijn van de toestand van het materiaal voor, tijdens en na de uitvoering (zie hoofdstuk 4). Uit Nederlandse en internationale ervaring is gebleken dat het hele proces van grondbewerking van het moment van winnen tot aan het verwerken en afwerken van de grondconstructie een grote invloed heeft op vrijwel alle constructieve gedragseigenschappen. Figuur 14 geeft schematisch en vereenvoudigd aan in welke fase van het grondwerk welke eigenschappen worden beïnvloed. In deze paragraaf is gebruikgemaakt van oude en recente publicaties over dit onderwerp, zoals [2], [3] en [29], [62] en [65].



Figuur 14 Voorbeelden van beïnvloeding van aard- en gedragseigenschappen tijdens de verschillende fasen van grondwerk met klei

Door de wijze van uitvoering kunnen belangrijke eigenschappen worden beïnvloed. Voorbeelden zijn het watergehalte en de daaraan gekoppelde consistentie-index, de dichtheid en de verdichtingsgraad. Uit diverse onderzoeken blijkt dat deze toestandparameters weer een duidelijke relatie hebben met constructieve gedragseigenschappen, zoals doorlatendheid, erosiebestendigheid, vormvastheid, sterkte, gewicht, begroeibaarheid, verwekingsgevoeligheid en structuurvorming.

In de dijkenbouw worden vaak standardeisen gesteld aan de consistentie-index en verdichtingsgraad van klei in verschillende dijkonderdelen, zie Tabel 24.

Tabel 24 Eisen aan de consistentie-index en verdichtingsgraad in dijkenbouw met klei (bronnen [14] en [29])

| Eis | Toelichting |
|--|--|
| De consistentie-index voor klei, leem of silt in de kern is hoger dan 0,60 | Door klei met deze consistentie index aan te brengen in de kern ontstaat een goede verdichting, dichtbij het natuurlijke watergehalte in de kern, zodat nazakking door klink gering is |
| De consistentie-index voor klei in de deklagen is hoger dan 0,75 | Door klei met deze consistentie-index aan te brengen in de deklaag ontstaat een goede verdichting, dichtbij het natuurlijke evenwichtswatergehalte in de deklagen, zodat nazakking door klink en vorming van permanent wijde spleten gering zijn |

| Eis | Toelichting |
|--|--|
| De consistentie-index is kleiner dan 1,0 | Om droge, slecht verdichtbare kluiten te voorkomen wordt afgeraden om te werken met klei met een consistentie-index hoger dan 1,0 (de uitrolgrens) |
| De minimale verdichtingsgraad van de klei moet gemiddeld 97% van de maximale proctordichtheid bij aanwezig vochtgehalte bedragen | Een lage verdichtingsgraad betekent veel lucht in de grond en minder samenhang. Dit is ongunstig voor de vele constructieve gedragseigenschappen |

Koppeling gerealiseerde eigenschappen en ontwerp

Het Handboek Dijkenbouw [29] beschrijft de goede gebruiken uit de Nederlandse dijkenbouw en geeft een goed overzicht van gebruikelijke praktische uitvoeringseisen. Opvolging van de aanbevelingen uit dit handboek is van groot belang voor het behalen van goede constructieve eigenschappen. Er is normaal gesproken in Nederland bij grond die voldoet aan standaardseisen geen terugkoppeling tussen de gerealiseerde verdichtingsgraad of consistentie-index en de constructieve gedragseigenschappen uit het ontwerp. Een uitzondering is nadere detaillering tijdens de *site engineering* in de realisatiefase. In sommige ontwerpculturen, zoals in de Verenigde Staten [66], het Verenigd Koninkrijk [67] en Frankrijk [68] wordt de wijze van grondbewerking en verdichting in meer detail en explicieter voorgeschreven. Vaak is dat ook een gevolg van de verscheidenheid aan grondsoorten dat daar verwerkt wordt in grondlichamen.

Benutting verborgen reserves

Oud en recent literatuuronderzoek zoals [14], [62] en [65] beschrijven de mogelijke aanwezigheid van een aanzienlijke reserve in constructieve gedragseigenschappen wanneer klei goed is verdicht bij een hoge consistentie-index of bij een watergehalte dicht bij het optimum watergehalte uit de Proctorproef voor grond dieper dan circa 1 meter in het dijklichaam. Deze verborgen reserves kunnen benut worden wanneer gebiedseigen grond (net) niet aan de standaardseisen voldoet. Wel is het hierbij raadzaam om stil te staan bij de verouderingsprocessen (zie paragraaf 4.5).

5.4.2 Rijping in bodem

De mate waarin klei is gerijpt onder natuurlijke omstandigheden bepaalt in grote mate de benodigde inspanning tijdens de uitvoering om de gewenste constructieve eigenschappen te krijgen. In Nederland is veel praktische kennis opgedaan met rijping van kleibodems, met name bij het droogleggen van de IJsselmeerpolders en de projecten rond Euroklei (1970-1985). Ervaringen met de eigenschappen van grond bij kleiwinning in het gebied en lokaal grondonderzoek op de winlocaties zijn essentieel om de vereiste inspanning te bepalen. De verouderingsprocessen en de onderliggende processen staan beschreven paragraaf 4.5. Hier staat ook met welke parameters de mate van rijping kan worden bepaald.

5.4.3 Winning

De methode van kleiwinning leidt tot grote verschillen in eigenschappen en heeft grote gevolgen voor de vervolgbewerkingen.

Meestal is sprake van droge kleiwinning. In het Handboek Dijkenbouw [29] staat een beschrijving van aspecten die van belang zijn bij kleiwinning. De sterke ruimtelijke variatie van kleivoorkomens in de uiterwaarden van het rivierengebied is een belangrijk aandachtspunt bij kleiwinning in het rivierengebied. Uitkarteren van wingebieden vergt dan bijzondere aandacht. Wanneer kleilagen en zandlenzen zeer afwisselend voorkomen, is menging van zand en klei bij het winnen niet te voorkomen. De complexiteit van de afzetting blijkt uit gedegen grondonderzoek. Het is raadzaam om vooraf op basis van geologische gebiedskenmerken een eerste verkenning te doen van de geschiktheid van het gebied voor kleiwinning. Verder kunnen conditionerende onderzoeken bepalend zijn voor de geschiktheid van het gebied voor winning, met name milieutechnisch onderzoek. Milieueisen worden echter niet behandeld in dit Technisch kader.

Daarnaast is het watergehalte van de klei uit het wingebed een bepalende factor voor de benodigde inspanning om het materiaal gereed te krijgen voor verwerken in de ophoging. Onderstaande passage uit een handboek van de US Army Corps of Engineers is hier ook van toepassing. De afweging van lokale winning hangt ook sterk samen met de effectiviteit en de mogelijkheden van kunstmatige rijping in depot, zie paragraaf 5.4.5.

“Where compacted levees are planned, it is necessary to obtain borrow material with water content low enough to allow placement and adequate compaction. The cost of drying borrow material to suitable water contents can be very high, in many cases exceeding the cost of longer haul distances to obtain material that can be placed without drying. Borrow soils undergo seasonal water content variations;; hence water content data should be based on samples obtained from borrow areas in that season of the year when levee construction is planned. Possible variation of water contents during the construction season should also be considered.” USACE [58]

Het winnen van klei uit baggerspecie gebeurt nat, bijvoorbeeld met een sleepopperzuiger of mechanisch baggeren. Bij natte kleiwinning, zeker met een sleepopperzuiger, is het watergehalte van winmateriaal extreem hoog in vergelijking tot de droge methode. Dit vereist erg veel inspanning om het gewonnen materiaal om te vormen tot constructief ophoogmateriaal. De aanleiding om toch nat te winnen komt voort uit de wingebeden zelf: de noodzaak tot het verwijderen van slib uit estuaria en havens. Decennialang is in Nederland geëxperimenteerd met het omzetten van baggerslib naar klei die in ophogingen en ook in dijken kon worden toegepast. Tot aan de jaren 80 ging het daarbij vooral om baggerslib uit de Rotterdamse haven (Euroklei). Daarna is ook in het Eems-Dollardgebied grote aandacht ontstaan voor rijping van klei uit baggerspecie. Het gebaggerde slib wordt tegenwoordig via een kleirijperij omgezet in klei voor toepassing in de dijkverbouwing en landbouwgrond, zie uitgelicht voorbeeld in paragraaf 5.4.5. Deze techniek wordt in Duitsland in hetzelfde gebied en ook in de havens van Hamburg en Bremen sinds de jaren 70 toegepast. Ook in België zijn voorbeelden van grootschalige winning van klei uit baggerspecie uit de haven van Antwerpen, zie uitgelicht voorbeeld in paragraaf 5.4.5.

5.4.4 Verwerken in depot

Soms is opslag in tijdelijke depots noodzakelijk. Dit vereist tijdig inzicht in de randvoorwaarden voor de aanleg en inrichting van het depot, de aanrijroutes tussen winlocatie, depot en dijkversterking en de benodigde verwerkings- en rijpingstijd.

De volgende aspecten zijn bepalend voor de locatie en het ruimtegebruik van het depot:

- Gebiedseigen grond kan een wat grotere ruimtelijke variatie hebben dan grond van een grondleverancier die over grote partijen van geselecteerde grond beschikt. Bij een heterogeen winningsgebied moet het winmateriaal nader gesorteerd worden. Te denken valt aan sortering op basis van visuele identificatie bij ontgraven of laden en lossen en eenvoudige classificatieproefjes: zandige kleigrond scheiden van de vette klei met hoog lutumgehalte etc. Bij grote heterogeniteit neemt de complexiteit van het sorteren en daarmee het beslag op depotruimte toe. Wanneer minder wordt gesorteerd, neemt de heterogeniteit van het materiaal toe wat ongunstig kan zijn voor de constructieve eigenschappen. Te veel zandinsluiting in klei heeft bijvoorbeeld een ongunstig effect op de doorlatendheid en erosiebestendigheid.
- Er mag geen vrij water zijn op plaatsen waar klei verwerkt wordt. De drainage moet hierop ingericht zijn en de werkoppervlakken moeten voldoende afschot hebben.
- Om indringen van vrij water, als gevolg van neerslag, tegen te gaan, moet het oppervlak van de kleigrond worden verdicht en glad afgewerkt.
- Te natte kleigrond (maar met een in-situ watergehalte ruim beneden de vloiegrens) kan gedroogd worden binnen 1 tot 3 maanden, in het late voorjaar tot het vroege najaar in Nederland onder niet extreem natte omstandigheden.
- Te natte klei kan bij gebrek aan tijd met ongebluste kalk geschikt gemaakt worden. Kosten zijn daarbij een belangrijke overweging. Ook moet rekening worden gehouden met verandering van overige eigenschappen.

- Wanneer de aangevoerde klei uit het wingebied uit kluiten bestaat, moeten deze in het depot in fijnere delen worden gedrukt. Voor deze verwerkingsslag is een voldoende harde ondergrond nodig.

Het inrichten van een depot kan op verschillende manieren en is erg afhankelijk van de benodigde inspanning om het materiaal op het juiste watergehalte te krijgen. Soms zijn kleine depots op de dijk zelf al voldoende.

Het in depot brengen van materiaal dat vrijkomt bij natte kleiwinning is het meest ingrijpend. Dit vraagt om zeer grote depots en het rijpen vereist veel tijd. Voorbeelden zijn de kleirijperijen in het Eems-Dollardgebied. Bij opgespoten baggerspecie spelen specifieke zaken een rol, zoals segregatie van klei en zand bij het einde van de stortpijp en zandcapping op het stort.

5.4.5 Rijping in depot

Onder invloed van geochemische en biologische processen verbeteren de eigenschappen van klei vaak. Dit is mede een gevolg van ‘verdrogen versus vernatten’ en ‘bevriezen versus dooien’. Door deze processen nemen bestendigheid voor slijterisatie en de sterkte van het materiaal toe in de tijd [69]. Rijpen is dus niet uitsluitend een ontwateringsproces.

Dat rijping een aanzienlijk effect heeft op geotechnische eigenschappen, wordt door vele Nederlandse en buitenlandse geotechnici onderkend. Uit grondonderzoek blijkt dat de kleikern van bestaande kleidijken een relatief hoge dichtheid en sterkte heeft, zowel boven als onder de grondwaterstand. De (ongedraineerde) schuifsterkte van een kleikern is hoger dan op basis van belastinggeschiedenis mag worden verwacht. Ongedraineerde triaxiaalproeven laten vaak een dilatant gedrag zien wanneer het monster onder relatief hoge spanning wordt geconsolideerd om normaal geconsolideerd gedrag te benaderen. Een ander gunstig effect op sterkte is de aanwezigheid van zuigspanningen in onverzadigde dijkklei waardoor de microstructuur van klei irreversibel wordt aangepast en de klei stevig blijft.

Het versnellen van het rijpingsproces van klei in het depot is vaak een essentiële schakel in het uitvoeringsproces wanneer de klei in de winplaats een te hoog watergehalte bezit. Wanneer de klei te nat naar de bouwplaats wordt gebracht, is het niet mogelijk om het op de juiste wijze te verdichten. Let wel: verdichting zorgt niet voor het uitpersen van water, maar vooral voor het omvormen van kluiten tot een homogene massa met een beperkte hoeveelheid luchtinsluiting.

Voorbeelden klei uit baggerspecie

In de Pilot Kleirijperij onderzoekt een alliantie van overheden en marktpartijen verschillende manieren om slib uit het Eems-Dollardgebied om te vormen tot klei voor dijkversterking en ophoogmateriaal voor landbouwgrond. De gerijpte baggerspecie wordt toegepast in de het demonstratieproject Brede Groene Dijk en daar wordt ook getest op erosiebestendigheid. In de Kleirijperij wordt in grote rijpingsvakken geëxperimenteerd met verschillende rijpingstechnieken, zoals:

- *Het variëren met laagdiktes.*
- *Het aanbrengen van zandlagen en drainagebuizen onder het depot.*
- *Het gebruik van zoetwater in de depots (opmengen en opzetten).*
- *Het inzaaien van vegetatie in het depot.*
- *Het omwerken of omzetten van klei.*
- *Het trekken van voren.*

Het hoge zout- en organische stofgehalte in het slib was aanleiding voor deze experimenten. Het oorspronkelijke doel van de Pilot Kleirijperij was om na te gaan hoe deze eigenschappen met diverse rijpingmethoden konden worden beïnvloed. Het onderzoek levert ondertussen een schat aan informatie op rond rijpingsgedrag van baggerspecie.

*Bij het omvormen van slib of baggerspecie tot ophoogmateriaal kan de techniek van het laguneren worden toegepast. Bij laguneren wordt het slib ontwaterd door zwaartekracht en verdamping onder natuurlijk verloop. Het watergehalte wordt gereduceerd door het materiaal 'op ruggen' te zetten en deze regelmatig te keren. Andere mogelijkheden van (mechanisch) ontwateren zijn 'persfabrieken' of op kleinere schaal mobiele filterpersen. Hierbij worden 'koeken' gefabriceerd door het slib in een geotextiele zak onder hoge druk te ontwateren. Een voorbeeld van toepassing daarvan is het **AMORAS-project** in de haven van Antwerpen. De mate van ontwatering die kan worden bereikt met laguneren hangt sterk af van het slib en de beschikbare tijd en ruimte. Binnen het project in het stroomgebied van de Schelde wordt slib mechanisch gebaggerd. Dit zorgt voor een lager watergehalte in de gebaggerde specie, waardoor het slib met laguneren sneller tot een bruikbaar product kan worden omgezet.*

5.4.6 Verwerken in ophoging en verdichting

De uiteindelijk bereikte verdichting is essentieel om de juiste constructieve gedragseigenschappen te krijgen, zoals eisen aan ondoorlatendheid, sterkte en erosiebestendigheid. Wereldwijd is dit een onderkend aspect, zie "Grondgestuurd ontwerpen; 'Best practices'" [2] voor een overzicht. Een goede verdichting wordt niet alleen bereikt door eisen te stellen aan de verdichtingsgraad of het watergehalte bij aanvang van verdichten (zie Tabel 24) maar ook door uitvoeringseisen. In de Quick Wins [65] is aangegeven dat uitvoeringseisen stellen (zoals het voorschrijven van de wijze van verdichten) effectiever en praktischer is dan uitsluitend 'eindproducteisen' te stellen aan de verdichtingsgraad. Deze werkwijze komt overeen met de werkwijze die bijvoorbeeld in het Verenigd Koninkrijk ook gebruikelijk is onder de noemer *Method Specifications* als tegenhanger van *End Product Specifications*, zie [67].

We gebruiken vanaf hier daarom ook de term methodespecificatie voor het stellen van uitvoeringseisen.

Voorbeelden hiervan zijn:

- Het verdichten in lagen van 20 centimeter geeft een veel betere verdichtingsgraad dan in lagen van 50 centimeter. Wanneer verdichting voor een bepaald functioneel onderdeel, zoals de onderlaag van een buitenbekleding, van groot belang is om een voldoende lage doorlatendheid te halen, dan is het verhogen van de verdichtingsinspanning een effectief middel om te compenseren bij afwijkende aardeigenschappen. Het lerend ontwerpen en controle door metingen van het bulkgedrag is een goed alternatief.
- In "Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking - aanbevelingen voor ontwerp en uitvoering" [65] wordt gesteld dat de Nederlandse dijkenbouwmethode van verdichten van 0,4 meter dikke slagen kleigrond met een bulldozer van 10 - 15 ton met 0,4 - 0,6 meter brede tracks niet tot een optimale verdichting leidt. Dit geeft een kleipakket waarvan gemiddeld slechts ongeveer de bovenste helft van de slagen goed verdicht is. Deze werkwijze resulteert in een klink van 4 - 6% en niet in de gewenste, zeer lage specifieke doorlatendheid, maar vergelijkbaar met die van klei met een bodemstructuur.
- Intensief verdichten van kleigrond in slagen met een dikte van 0,2 meter of minder resulteert in een kleipakket met een lage doorlatendheid. Dat kleipakket is zeer goed bestand tegen ontgroning door golven of overslag voor de grond beneden de door bodemstructuur beïnvloede zone (die zeer ondiep is nabij de hoogwaterlijn in getijdegebieden).

Het verdient aanbeveling de kwaliteit van de kleilagen te borgen door de werkwijze en controle daarop voor te schrijven. Controleren kan bijvoorbeeld met gps-tracking. Het werken met methodespecificatie en een verdichtingspraktijkproef voorafgaand aan het werk kan ook zeker zinvol zijn wanneer er weinig ervaring is met het verdichten van gebiedseigen grond. Of wanneer wordt verwacht dat gebiedseigen grond moeilijker verdichtbaar is vanwege bijzondere eigenschappen, zoals de Groningse knipklei of keileem.

In de Franse wegophogingen is ruime ervaring met het toepassen van additieven om natte grond beter te kunnen verdichten. De Franse richtlijn GTR 92 [68] geeft een uitgebreid beslisschema, dat aan de hand van verschillende

verwerkingsituaties (bijvoorbeeld materiaalbeschrijvingen, grootte van ophoging en weeromstandigheden) beschrijft welke bewerkingen uitgevoerd moeten worden. Een Nederlandse vertaling van het schema is opgenomen in het Handboek Grondgedrag [58].



Foto 4 Erosieproeven kalk met klei bij overgangen: aanleg, beproeven, resultaat (Hedwigepolder 2022)

In deze Franse richtlijn wordt ook het toevoegen van additieven bij nat weer voorgeschreven. Onderscheid wordt gemaakt in hydraulisch bindmiddel (zoals cement); ongebluste kalk; een combinatie van beide; of het aanpassen van de korrelgrootteverdeling van het ophoogmateriaal. De additieven zijn in eerste instantie gericht op het controleren van het watergehalte, zodat de grond kan worden verwerkt en verdicht. Naast het reduceren van het watergehalte kunnen additieven, met name hydraulisch bindmiddel en ongebluste kalk, de sterkte van de grond beïnvloeden. Cement en ongebluste kalk worden soms toegepast om de gewenste verdichtingseisen te behalen of om te compenseren voor langetermijneffecten van risico van uitlogen van kalk. Wanneer hydraulisch gebonden additieven zoals cement worden toegepast, zal het materiaal ook cementeren. Onderzocht moet worden of er geen risico's kunnen ontstaan door bros gedrag, zoals scheurvorming met als gevolg interne erosie (contacterosie) en externe erosie van delen van het dijklichaam. Dit geldt met name bij bouwen op slappe ondergrond. Bij toepassing van additieven in ophoogmateriaal van dijken is altijd nader onderzoek of kennis vanuit ervaringen elders nodig, bijvoorbeeld internationaal. Ook moet de ontwerper nagaan hoe het materiaal het gedrag van de dijk in zijn geheel beïnvloedt.

5.4.7 Afwerken en inzaaien

Nadat de dijk op hoogte is gebracht, kan deze worden afgewerkt. Het Handboek Dijkenbouw [29] gaat nader in op het afwerken van het grondlichaam, zoals het egaliseren, het tonrond maken van de kruin en bol maken van taluds, het onder afschot leggen van het maaiveld van bermen ter voorkoming van verzamelen en infiltratie van regenwater.

Voor het afwerken van de toplaag (substraat) en het inzaaien geldt in het bijzonder voor gebiedseigen grond een aantal aandachtspunten:

- Hergebruik van bestaande, goede substraatlagen moeten worden meegenomen in het grondstromenplan. Een bestaande substraatlaag kan erg waardevol zijn wanneer deze over de juiste botanische eigenschappen of zadenbank beschikt. Bij gebruik van substraat van buiten het gebied kunnen gebiedsvreemde en ongewenste zaden, kruidenmengsels of bodemleven worden overgebracht.
- Hergebruik van gebiedseigen substraat kan de ontwikkelingstijd van graszode inkorten.
- Het gebruik van relatief zoute grond als substraat kan grasgroei belemmeren. Het is raadzaam om vooral naar ervaringen in het gebied met een vergelijkbaar milieu te kijken. In sommige gevallen heeft het gras zich prima

ontwikkeld in een relatief zout milieu. We adviseren om hier de stap te maken naar functionele eigenschappen. Ook een vooronderzoek naar grasgroei op zout substraat kan lonen.

5.5 Aanpassen van het beheer en onderhoud na realisatie

Na de realisatiefase kan op verschillende manieren worden aangetoond dat de dijk voldoet aan de wensen van beheer en aan de waterveiligheidseisen tijdens de levensduur. Dit kan bijvoorbeeld door eisen te stellen in de uitgangstoets of afspraken te maken over monitoren en beheer. Hierbij is het noodzakelijk dat deze eisen en afspraken aansluiten bij de ontwerpkeuzes die je eerder al gemaakt hebt.

5.5.1 Uitgangstoets en opleverdossier

Bij de uitgangstoets kan de beheerder eisen stellen aan de nazorg en het opleverdossier van het uitgevoerde werk. Zeker in geval van een grondgestuurd ontwerp met grond die niet aan standaard specificaties voldoet, is het sterk aan te raden om aanbevelingen voor een beheer- en onderhoudsplan op te laten nemen in dit dossier en afspraken te maken over nazorg, inclusief monitoring en beheersmaatregelen.

5.5.2 Monitoren en beheer

Na oplevering van de dijk blijven constructieve eigenschappen veranderen. Verouderingsprocessen van grond zijn in hoofdstuk 4 uitgebreid toegelicht. Bij het gebruik van gebiedseigen grond met afwijkende eigenschappen is er een directe aanleiding voor het langdurig en systematisch volgen van effecten van veroudering op constructieve gedragseigenschappen. Het lerend ontwerpen en kennisdelen, als kenmerk van grondgestuurd ontwerpen, komt mooi terug in het demonstratieproject Brede Groene Dijk. In dat project worden constructieve gedragseigenschappen met fundamenteel onderzoek en grote schaalproeven onderzocht. Hier worden diverse grondeigenschappen tijdens enkele jaren gemonitord, zoals het watergehalte, het zoutgehalte en het organische stofgehalte. Kennis uit dit demonstratieproject kan later op grotere schaal worden toegepast.

Juist bij gebiedseigen grond kan geleerd worden van jarenlange ervaring vanuit het beheer en onderhoud met toepassing van lokale grond in dijken. Grondig inspecteren van de dijken, bijvoorbeeld door het graven van proefkuilen en deze professioneel te onderzoeken, biedt inzichten in het gedrag van gebiedseigen grond. Hierdoor heeft het gebruik van gebiedseigen grond in sommige gevallen juist een duidelijk voordeel ten opzichte van grond die wordt aangevoerd van verder gelegen wingebieden.

Monitoring van het langetermijngedrag is ook relevant in geval van veranderende gemiddelde belastingen. Deze kunnen bijvoorbeeld veranderen als gevolg van droogte door klimaatverandering. Ook kan een dijkonderdeel een belangrijkere functie krijgen door een wijziging in ontwerpbelastingen, zoals de binnenbekleding bij het toestaan van grotere overslagdebieten.

Het monitoren van gedragskenmerken is daarom van groot belang. Hiervoor is de terugkoppeling tussen ontwerp en beheer van groot belang. Bij de uitgangstoets (zie paragraaf 5.5.1) heeft de beheerder een controlemiddel.

Het systematisch monitoren van gedragseigenschappen kan direct input geven bij een eerstvolgende beoordelingsronde en kan eventueel ook projectoverstijgend worden gedeeld en toegepast.

5.5.3 Extra kleireserves binnen beheerzone

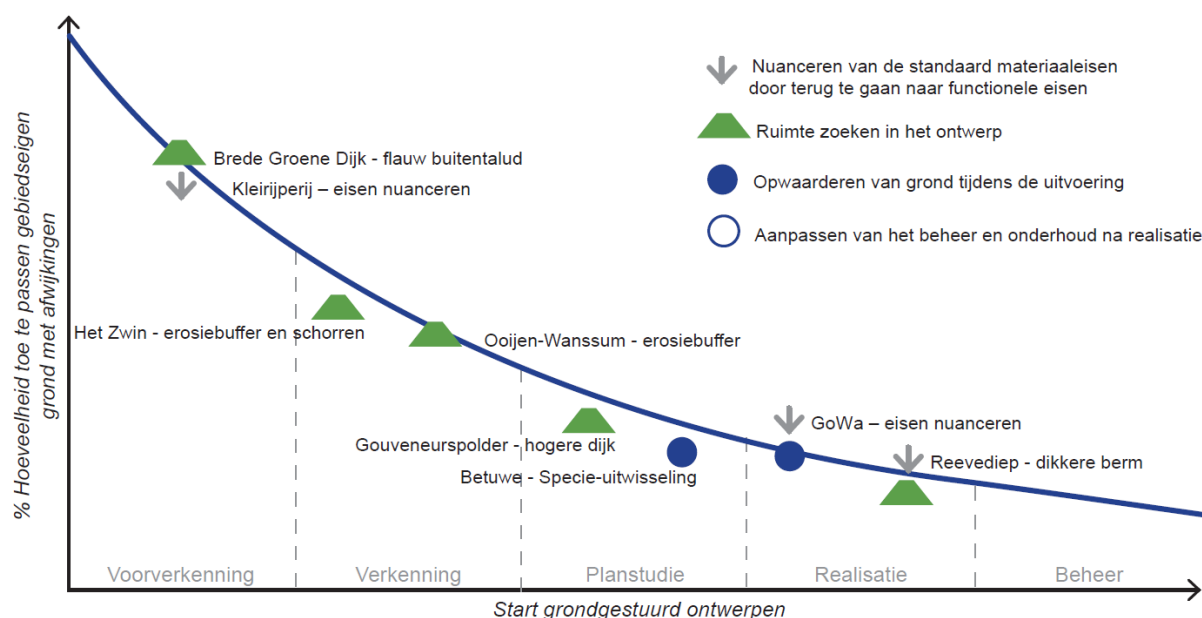
Een optie is om tijdens of na de realisatie meer te doen dan noodzakelijk is voor een veilige dijk. Een praktische toepassing is bijvoorbeeld het aanbrengen van kleireserves op en langs de dijken, al dan niet in combinatie met beheerstroken. Of het aanbrengen van extra leeflagen die medegebruik van de berm mogelijk maken. Dit laatste past Waterschap Rivierenland bijvoorbeeld op grote schaal toe op het binnenbeloop van de Waaldijken. Hiermee ontwerp je geen dijk voor een bepaalde planperiode, maar ga je voor een ontwerp dat streeft naar een zo hoog mogelijk behoud van waarden. Het verlengen van de levensduur kan het gebruik van primaire bouwstoffen sterk verlagen, oftewel een levensduurontwerp.

6 Slotopmerkingen

U bent aan het eind gekomen van dit Technisch kader. In dit hoofdstuk delen we enkele inzichten uit de voorbeelden en schetsen we het vervolg. Want dit Technisch kader is geen eindpunt, het is een levend document dat we willen blijven verrijken met uw ervaringen. Zowel met praktijkvoorbeelden als met het gebruik van dit Technisch kader. We nodigen u uit om ermee aan de slag te gaan en uw ervaringen te delen.

6.1 Inzichten uit de voorbeelden

In dit Technisch kader zijn veel voorbeelden van het toepassen van gebiedseigen grond genoemd. Ze staan nog eens samengevat in onderstaande figuur. De voorbeelden zijn uitgezet naar projectfase en de hoeveelheid toegepaste gebiedseigen grond. Daaruit komt duidelijk naar voren dat hoe eerder je begint, hoe meer gebiedseigen grond toegepast kan worden.



Figuur 15 Voorbeelden van ontwerpaanpassingen die gebruik van gebiedseigen grond mogelijk maken

Bij de voorbeelden is ook onderscheid gemaakt tussen de verschillende mogelijkheden om onderbouwd af te wijken (zie paragraaf 4.2). Hieruit zijn ook nog enkele conclusies te trekken:

- Nuancering eisen. Het nuanceren van eisen kan in alle projectfasen worden doorgevoerd, tenzij het een groot effect heeft op de randvoorwaarden van het planproces, bijvoorbeeld bij de Kleirijperij. Hoe later in het proces, hoe minder ruimte er is voor wijzigingen in de geometrie. Wijzigingen die binnen de randvoorwaarden van het VKA passen, kunnen ook in een latere fase nog worden uitgewerkt (Dijkversterking Gorinchem - Waardenburg (GoWa), Reevediep).
- Ruimte zoeken in het ontwerp. Bij vroegtijdig nadenken over het toepassen van hoeveelheden gebiedseigen grond met afwijkende eigenschappen is de kans van slagen het grootst. Bij Brede Groene Dijk, het Zwin en Ooijen-Wanssum is de in de voorverkenningfase en tijdens de verkenning gestart en gelijk opgetrokken met gebiedspartners, waardoor voldoende tijd en ruimte was om relatief grote geometrische aanpassingen van de dijk te kunnen doorvoeren. Voor het aanpassen van de geometrie met grote effecten op het ruimtebeslag is het noodzakelijk om vroeg in het proces te starten en de gevolgen van het ruimtebeslag mee te nemen in het

planproces. Wijzigingen die binnen de randvoorwaarden van het VKA passen, kunnen ook in een latere fase nog worden uitgewerkt (Gouveneurspolder, Reevediep).

- Opwaarderen van grond tijdens uitvoering. Als aanpassingen vanuit het planproces nog nauwelijks mogelijk zijn, kan dit een terugvaloptie zijn (Betuwe, GoWa). Ook hier is van toepassing, hoe later in het proces, hoe minder ruimte voor wijzigingen. Hiermee is het logisch om een kleirijperij in een vroegtijdig stadium te starten. Het toepassen van een andere verdichtingsmethodiek kun je nog aanpassen net voor de uitvoering.
- Aanpassen van beheer en onderhoud na realisatie. Dit is meestal in combinatie met een ontwerpaanpassing. Bijvoorbeeld bij Ooijen-Wanssum zijn er afspraken gemaakt over het dijk- en natuurbeheer van de steilranddijk.

Dit is een selectie uit een langere lijst met bruikbare voorbeelden uit het verleden. Daarnaast ontstaan gaandeweg ook steeds nieuwe voorbeelden.

6.2 Aandachtspunten en kansen voor de implementatiefase

Om grondgestuurd ontwerpen een stap verder te brengen en toe te passen, is het belangrijk om ervaringen te delen en af te blijven stemmen met projectoverstijgende ontwikkelingen, bijvoorbeeld uit de projecten Heel, Innovatieversneller en Brede Groene Dijk. Ook ontwikkelingen in regionale keringen zijn interessant om te volgen. We beschrijven hierna een aantal aandachtspunten en kansen voor de implementatiefase.

Ervaringen delen

Op verschillende plaatsen in het land worden stappen gezet om grondgestuurd ontwerpen verder te ontwikkelen, zowel bij primaire dijken als bij regionale keringen. Op dit moment is het nog niet bekend hoe en met wie u deze ervaringen kunt delen. Kijk voor de laatste stand van zaken op de site van de Innovatieversneller:

www.hwbp.nl/innoveren/innovatieprojecten/de-innovatieversneller.

Opleiding

Voor de verandering van de ontwerpcultuur, is het van belang om de kennis van grondgestuurd ontwerpen ook in de opleidingen mee te nemen, zowel bij HWBP, PAO-TM en Stichting Wateropleidingen als bij de universitaire en hbo-opleidingen.

Kansenscan en Storylines

Naast het opstellen van dit Technisch kader heeft de POV-DGG ook een factsheet Kansenscan en een aantal Storylines opgesteld. Hierin wordt naast techniek ook aandacht besteed aan andere aspecten, zoals subsidiabiliteit, milieukundige vergunbaarheid en planbaarheid. Zie hiervoor de Roadmap Duurzame dijkversterkingen:

<https://www.hwbp.nl/documenten/rapporten/2020/04/14/roadmap-duurzaamheid>

Vervolgonderzoek

Niet alle kennis is met dit Technisch kader voorhanden. Suggesties voor vervolgonderzoek zijn:

- Meer inzicht verkrijgen in de bepaalde typen klei die in Nederland aanwezig zijn. Hiermee kun je beter voorspellen welk type klei beschikbaar is in het gebied. De te beantwoorden vraag is dan: welk type klei past bij DNA van dit gebied?
- Uitbreiden en verbeteren van bestaande modellen en voorbeelden om het (verouderings)gedrag van afwijkende kleisoorten te bepalen.
- De relatie tussen aard-/structureigenschappen en constructieve eigenschappen nader uitwerken en onderzoeken.
- Technisch kader uitbreiden met andere grondsoorten.

Verdiepen bestaande kennis

Het is daarnaast zinvol om bestaande kennis verder te verdiepen. We denken dan in eerste instantie aan:

- Evalueren nieuwe NEN-EN-ISO 14688.
- Statistisch verwerken van database van materiaalkeuringen op dijkenklei om generieke verbanden af te leiden.
- Preciezer bepalen wat de voorspellende waarde is van visuele beschrijving van grond op het (met proeven te bepalen) precieze materiaalgedrag, inclusief het effect van bijmengingen/inhomogeniteiten.

Beschikbare kennis beter ontsluiten

Ook kunnen we bestaande kennis nog beter laten landen beter. Voorbeelden zijn:

- Bundelen van gebiedskennis van verschillende bronnen in één kaart van Nederland, die de geschiktheid van klei en mogelijk ook andere grondsoorten (voor dijken) toont.
- Makkelijker beschikbaar krijgen van historische data van gebieden.
- Toegankelijk maken van bodemkundige gegevens voor het ontwerpen van dijken. Veel van deze gegevens zijn beschikbaar maar worden nu niet worden gebruikt bij dijkontwerp. Een mogelijk voorbeeld is een Topotijdreeks met bodemkaarten en handleiding hoe je deze kunt gebruiken. Deze geeft antwoord op de vraag: Wat betekent een bepaalde grondsoort voor geotechnische uitgangspunten? [All-Risk Webinar series: June-July – All-Risk \(ncr-web.org\)](#)

Tot slot herhalen we onze oproep uit het voorwoord. Het toepassen van gebiedseigen grond in dijkversterkingen is een mooie kans. Wij wensen betrokkenen veel succes en plezier hiermee.

Literatuurlijst

- [1] Royal HaskoningDHV, „Analyse succesfactoren en gebiedspotentieel dijkversterking met gebiedseigen grond,” POV DGG, Waterschap Limburg, maart 2020.
- [2] Royal HaskoningDHV, „Grondgestuurd ontwerpen; 'Best practices' Internationaal,” POV DGG, Waterschap Limburg, concept februari 2021.
- [3] Fugro, „POV Dijkversterking met gebiedseigen grond, Fase 2 'best practices' Nederland,” POV DGG, Waterschap Limburg, maart 2021.
- [4] HEEL, Herleidbaar, Eenduidig en Expliciet samenwerken over de hele Levenscyclus, geopend 2021. [Online]. Available: <https://heel-nl.nu/downloads>.
- [5] Waterschap Rivierenland, „Materialisatie bekleding en kern van dijken WSRL,” Tiel, 2021.
- [6] Arcadis, Deltares, „Handelingsperspectief Geotechnisch Onderzoek - Opzetten en uitvoeren van risicogestuurd geotechnisch onderzoek voor HWBP projecten,” september 2017.
- [7] Fugro, „Protocol geotechnisch profileren van dijken,” POV DGG, Waterschap Noorderzijlvest, concept april 2020.
- [8] Rijkswaterstaat, „Vier quick wins grond en klei,” HWBP, 2018.
- [9] NEN, „NEN 5104 Geotechniek, Classificatie van onverharde grondmonsters,” NEN, Delft, 1989.
- [10] NEN, „NEN-EN-ISO 14688:2019, Geotechnisch onderzoek en beproeving - Identificatie en classificatie van grond (deel 1 en 2),” NEN, CEN, 2019.
- [11] Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Grondsoorten en delfstoffen bij naam, Delft: DWW, 2013.
- [12] VOTB, „Handreiking eenduidig aanbesteden volgens NEN-EN-ISO 14688,” VOTB, Castricum, 2020.
- [13] TAW, „Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 - bovenrivierengebied,” Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1985.
- [14] TAW, „Technisch Rapport Klei voor Dijken,” TAW, 1996.
- [15] CROW, Standaard RAW bepalingen 2020, Ede: CROW, 2020.
- [16] G. Kruse, „Studie voor richtlijnen klei op dijktafuds in het rivierengebied,” Deltares, Delft, 2010.
- [17] Rijkswaterstaat, „Schematiseringshandleiding Grasbekleding,” Rijkswaterstaat, 2021.
- [18] Alterra, „De Bodemkaart van Nederland digitaal,” Alterra, Wageningen, 2003.
- [19] TNO, „GeoTOP Modelling,” Utrecht, 2012.
- [20] Wageningen Environmental Research, „Geomorfologische Kaart,” Het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, [Online]. Available: <https://basisregistratieondergrond.nl/inhoud-bro/registratieobjecten/modellen/geomorfologische-kaart-gmm/>.
- [21] E. S. K.M. Cohen, „Vernieuwd digitaal basisbestand paleogeografie van de Rijn-Maas Delta,” Universiteit Utrecht, Utrecht, 2012.
- [22] M. v. M. e. al., „Clay resources in teh Netherlands,” *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, 2007.
- [23] TNO, „www.natuurinformatie.nl,” TNO, 2021. [Online]. Available: <http://www.natuurinformatie.nl/ndb.mcp/natuurdatabase.nl/i000328.html>. [Geopend 19 mei 2021].
- [24] Dienst Weg- en Waterbouwkunde, „Inventarisatie van kleivoorkomens in Nederland geschikt voor de grofkeramische industrie en de dijkbouw,” Delft, 1990.

- [25] Louis Bolk Instituut, „Organische stof in de Nederlandse bodem, feiten en discussie in perspectief,” Bunnik, 2019.
- [26] G. Kruse, „Klei eigenschappen in verband met het project "Ruimte voor de Rivier IJsseldelta",” Deltares, Delft, 2015.
- [27] CUR, *Beoordelingssysteem voor de begaanbaarheid van bouwterreinen*, Gouda: CUR, 2004.
- [28] M. Matula, „Rock and soil description and classification for engineering geological mapping report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping,” *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, vol. 24, pp. 235-274, 1981.
- [29] K. 'd Angremond, W. Halter, I. Groenouwe en M. Tonneijck, *Handboek Dijkenbouw*, HWBP, 2018.
- [30] L. Libbrecht, *Onderzoek naar grondstabilisatie met ongebluste kalk en met een alternatief materiaal van bouw- en slooppuin*, Gent: Universiteit Gent, 2010.
- [31] Laboratorium voor Grondmechanica Delft, „Kleigrond voor de bekleding van dijken: opmerkingen over het zwellen en krimpen en het ontwikkelen van structuur,” Delft, 1985.
- [32] P. Lubking, *Grondgedrag, feiten, normen en waarden met betrekking tot grond in de praktijk van de geotechniek*, Den Haag: StudieWAT, 2014.
- [33] D. B. H. W. e. J. E.-V. A.M. Weitz, „Application of TRISOPLAST for lining of landfills,” Staring Centrum, Wageningen, 1997.
- [34] J. Muijs, „Klei, bestekseisen t.b.v. constructie en uitvoering, overzicht huidige kennis en onderzoeksvoorstel,” COW, 1984.
- [35] Rijkswaterstaat Directie Zeeland, „Klei onder steenzettingen voor Oesterdam en Philipsdam,” 1985.
- [36] V. W. e. C. F., „The influence of intense fissuring on the mechanical behaviour of clays,” *Geotechnique*, vol. 61, nr. 12, pp. 1003-1018, 2011.
- [37] Deltares, „Dijkerosie 2021 - DE2 Vaststelling erosieparameters en lengte-effecten buitentalud,” Delft, 2022.
- [38] Dektares, „Test voor het bepalen van de samenhang van klei,” Delt, 2022.
- [39] „<https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/saturo-infiltrometer-field-saturated-hydraulic-conductivity>,” [Online]. [Geopend 12 september 2022].
- [40] M. v. Damme, „Incorporating the erosion sensitivity of local soils in a levee safety analysis,” POV DGG, Roermond, 2021.
- [41] ASTM, „Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test,” ASTM, West Conshohocken, 2020.
- [42] G. Mourik, „Predicton of the erosion velocity of a slope of clay due to wave attack - WTI 2017,” Deltares, Delft, 2015.
- [43] Witteveen + Bos en Dorst Waterbouw Consult, „Korte verkenning van de kleikennis in de markt,” 2022.
- [44] W. H. e. M. v. d. Meer, „Richtlijn ophogen met klei uit baggerspecie,” DWW, Delft, 2005.
- [45] M. v. d. Meer, *Verslag Expertsessie Brede Groene Dijk*, 2021.
- [46] Deltares, „POVM Actuele Sterkte, Macrostabieliteit Buitenwaarts, Stappenplan, Inschatting hersteltijd, Materiaalmodel en Probabilistische uitwerking,” Delft, 2020.
- [47] G. Y. S. R. Pembele W, „7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils (AP-UNSAT 2019),” in *Laboratory Tensile Strength Testing of Clay Soils using Direct Measurement*, 2019.
- [48] Ministerie van Infrastructuur en Milieu, „www.bodemrichtlijn.nl,” novemer 2016. [Online]. Available:

<https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemonderzoek/onderzoekstechnieken/bodemmicrobiologie-bodempr8359>. [Geopend 19 mei 2021].

- [49] Dienst Weg- en Waterbouwkunde, „Structuur in eisen voor loskorrelige steenmaterialen in de waterbouw, beschrijving van de systematiek en de betrokken parameters,” Delft, 1996.
- [50] P. T. e. W. Halter, „Stabiliteit losdammen hoger dan verwacht,” *Land + Water*, vol. 5/6, pp. 36-37, 2022.
- [51] Deltares, „Specificaties voor het toepassen van Noordse Leem in Weg- en Waterbouwwerken in Nederland,” Delft, 2019.
- [52] ISO 19901-8, „Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures - Part 8: Marine Soil Investigation,” 2014.
- [53] ENW, „Grondslagen voor hoogwaterbescherming,” 2017.
- [54] A. Skempton, „The colloidal "Activity" of Clays,” London, 1951.
- [55] CUR, „Beheer en onderhoud van waterkeringen en oevers, gedrag onder gebruiksbelasting,” Gouda, 1989.
- [56] B. C. G. v. G. J. S. I. van Grinsven, „The impact of climate change on soil ageing processes in levees,” WUR, Wageningen, 2020.
- [57] G. W. F. H. e. W. H. Wim Ponsteen, „Droogtescheuren in dijken afdichten met zwelklei, nut en noodzaak,” *Vakblad Geotechniek*, vol. 23, nr. Educom, p. 4, 2019.
- [58] Grondmechanica Delft, „Onderzoek van kleibekleding van dijken langs IJssel en Pannerdens Kanaal voor het ontwikkelen van keuringseisen voor klei,” Delft, 1986.
- [59] STOWA, „Deltafact bodemdaling,” STOWA, Amersfoort, 2020.
- [60] G. Kruse, „Toepassen klei met hoger zoutgehalte in dijklichamen,” Deltares, Delft, 2013.
- [61] STIBOKA, „Kleimineralogische en chemische karakteristieken van zeelei, rivierlei en beeklei,” Wageningen, 1985.
- [62] STOWA, „handreikinggrasbekleding.nl,” STOWA, 2021. [Online]. [Geopend 19 mei 2021].
- [63] L. P. e. I. Zonneveld, „Soil ripening and soil classification : initial soil formation of alluvial deposits with a classification of the resulting soils,” *International Institute for Land Reclamation and Improvement*, p. 128, 1965.
- [64] Laboratorium voor Grondmechanica Delft, „Taludbekleding van gezette steen, klei onder steenzettingen, verslag literatuur- en bureaustudies,” Delft, 1985.
- [65] E. a. M. The National Academy of Science, „Relationships between Erodibility and properties of soil,” The National Academies Press, Washington, 2019.
- [66] De Innovatieversneller, „Handelingsperspectief schuifsterkte onverzadigde zone,” 2021.
- [67] v. G. K. G. Meurs, „Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking - aanbevelingen voor ontwerp en uitvoering,” Deltares, 2017.
- [68] USACE, „Engineering and design - design and construction of levees,” Washington DC, 2000.
- [69] HA, „Manual of Contract documents for Highway Works - Volume 1: Specification for Highway Works (SHW), incl amendments 2016,” The Stationery Office, London, 2016.
- [70] MELT, „Guide des Terrassments Routiers,” 1992.
- [71] Deltares, „Technische Kansen en Mogelijkheden; Dijkversterking met gebiedseigen Grond,” Delft, 2020.
- [72] Terra et Aqua 138, The use of engineered sediments for dyke construction in the flood control area of Vlassenbroek, 2015.

- [73] TAW, „Handreiking Constructief Ontwerpen, onderzoek naar het constructief ontwerp van de dijkversterking,” 1994.
- [74] NEN, „NEN 9997-1+C2 Geotechnisch ontwerp van constructies,” NEN, Delft, 2017.
- [75] RAW, „Standaard RAW Bepalingen 2020”.
- [76] Grondmechnica Delft, „Onderzoek van kleibekleding van dijken aan zout en brak water in Friesland, Zuid Holland en Zeeland voor het ontwikkelen van keuringseisen voor klei,” Delft, 1987.
- [77] Rijkswaterstaat WVL, „Invloed Kalkgehalte op erosiebestendigheid klei, mailwisseling tussen W.R. Halter en M. Postma,” 2020.
- [78] Wikipedia, „nl.wikipedia.org,” Wikipedia, 2021. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Zout_water. [Geopend mei 19 2021].
- [79] ENW, „Addendum I bij de Leidraad Rivieren t.b.v. het ontwerpen van rivierdijken,” 2010.
- [80] ENW, „Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies,” Drukkerij Ando, Den Haag, 2007.
- [81] Deltares, „Technische kansen en mogelijkheden,” POV DGG, Waterschap Limburg, april 2020.
- [82] POV DGG, WL, WSAM, IRM, „Kansenscan voor de Maas,” concept 2021.
- [83] Rijkswaterstaat, Bouwend Nederland, Vereniging van Waterbouwers, „Website mindergrondrisico.nl,” 2021. [Online]. Available: <https://www.mindergrondrisico.nl/gereedschappen>.
- [84] Deltares, „Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking,” Deltares, Delft, 2017.

Bijlagen

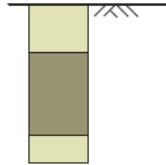
1 Begrippenlijst

| Begrip | Toelichting |
|----------------------------------|---|
| Aardeigenschap* | Eigenschap die wordt bepaald door grondsamenstelling. Deze eigenschap richt zich met name op de vaste stof. Voorbeeld: lutumgehalte. |
| Atterbergse grenzen | Uitrolgrens en vloeigrens, ook wel plasticiteitsgrenzen genoemd, waarmee de grenzen tussen het vaste, het plastische en het vloeibare gebied van cohesieve grond is bepaald, en waarmee de verwerkbaarheid kan worden ingeschat. |
| Bulkgedrag | Gedrag van een moot grond. Dus het geheel van vaste stof, water, lucht, structuurvorming en bodemleven. |
| Constructieve gedragseigenschap* | Eigenschap die betrekking heeft op een constructieve functie van een grondlaag of functioneel onderdeel van de dijk. Voorbeeld: doorlatendheid van de bekleding. |
| Depot | Herkomstplaats van grond. De term depot wordt in de praktijk zowel gebruikt voor een natuurlijke herkomstplaats, zoals een maaiveld dat wordt ontgraven, als voor een tijdelijke opslag van elders ontgraven grond. |
| Elementaire gedragseigenschap* | Eigenschap die betrekking heeft op het bulkgedrag van grond, zie bulkgedrag. Voorbeeld: volumegewicht en watergehalte. |
| Functionele eis | Eis die aan de dijkengrond wordt gesteld om één of meer functies van een dijkonderdeel te kunnen vervullen. |
| Gebiedseigen grond | In de buurt van het projectgebied beschikbare grond met beperkte transportafstand en zonder gebiedsvreemde componenten, inclusief grond uit de bestaande dijk. |
| Gedragseigenschap | Eigenschap die het bulkgedrag van grond beschrijft inclusief structuurvorming. Hierin speelt het geheel aan vaste stof, water, lucht en bodemleven een rol. |
| Grondgestuurd ontwerpen | Het vinden van een passend functioneel ontwerp gegeven de functionele eigenschappen en beperkingen van de beschikbare gebiedseigen grond. |
| Ingangstoets | Om de stabiliteit en voorspelbaarheid van het programma te vergroten, gebruikt de HWBP-alliantie een ingangstoets voor nieuwe projectaanmeldingen. De programmadirectie HWBP beoordeelt nieuwe aanvragen en programmeert de subsidieaanvragen in de tijd. |
| Kansenkaart | Beschikbare grond op projectniveau. |
| Kansenscan | Globaal overzicht van de beschikbare grond voor een bepaald gebied, bijvoorbeeld op riviertakniveau. |
| Kwalificatiemethode | Methoden om de basiseigenschappen van beschikbare grond in te schatten. |
| Kwaliteit van grond | Parameter die aangeeft hoe goed de grond voldoet aan de functionele eisen. |
| Levensduurontwerp | Ontwerp dat streeft naar een zo hoog mogelijk behoud van waarden. Het verlengen van de levensduur kan het gebruik van primaire bouwstoffen sterk verlagen. |
| Structuurvorming | Verandering van de onderlinge rangschikking en samenhang van de vaste gronddeeltjes (bodemstructuur of bodemmorfologie) |
| Suffosie | Erosie van fijne deeltjes uit sterk gegradeerd materiaal |
| Toestandparameter* | Meetbare parameter die een grondeigenschap uitdrukt, zoals relatieve dichtheid, verdichtingsgraad. |
| Uitgangstoets | Een toets waarmee wordt aangetoond dat de dijk na de realisatiefase, voldoet aan de wensen van beheer en aan de waterveiligheidseisen tijdens de levensduur. |
| Verificatiemethode | Vastgestelde methode om de vereiste functionele grondeigenschappen op eenduidige wijze aan te tonen en te vergelijken met de door de ontwerper vastgestelde functionele specificaties, rekening houdend met de specifieke ontwerpkeuzes. |
| Vermoeiing | Verandering van grondeigenschap in de tijd door wisselende belasting, die nadelig is voor de veiligheid van een dijk. |
| Veroudering | Verandering van grondeigenschap in de tijd. Kan zowel positief als negatief zijn. |

*Om dit begrip beter te kunnen begrijpen is onderstaand figuur opgenomen.

Definities van verschillende typen grondeigenschappen in figuren:

- Aardeigenschappen
- Elementaire gedragseigenschappen
- Constructieve gedragseigenschappen
- Toestandsparameters



Constructieve gedragseigenschap van een grondlaag voor zover van belang voor de constructieve functie van het grondlichaam. **Voorbeelden:** gewicht, schuifsterkte

Gedragseigenschappen en in sommige gevallen ook aardeigenschappen (denk aan org. stof- en zoutgehalte) zijn toestandsafhankelijk.

Toestandsparameters beschrijven toestand waarin de grond zich bevindt. Het is een meetbare parameter die verandering van een grondeigenschap uitdrukt.

Hieronder twee voorbeelden:



Aardeigenschappen hebben betrekking op de vaste stof.

Voorbeelden:

- lutumgehalte,
- zandgehalte,
- korrelverdeling,
- korrelvorm

Elementaire gedragseigenschappen

Zeggen iets over het bulkgedrag van grond, hierin spelen het geheel van vaste stof, water en lucht en bodemleven een rol

Voorbeelden:

- volumegewicht,
- watergehalte,
- ongedraineerde sterkte,
- hoek van inw. wrijving en cohesie



Verandering door rijping

Voorbeelden van toestandsparameter zijn consistentie index (watergehalte t.o.v. Atterbergse grenzen) en rijpingsgraad



Verandering door verdichting

Toestandsparameter: verdichtingsgraad (in-situ droge dichtheid t.o.v. Proctor dichtheid)



2 Factsheets kleiparameters en eisen

2.1 Plasticiteitsindex

Voorkomende waarden

In het NEN-EN-ISO 14688 [10] plasticiteitsdiagram kunnen plasticiteitsindexen tot 80% worden geplot. Meestal vallen waarden hierbinnen. In de praktijk zijn echter bij sterk organische kleisoorten uitschieters boven de 80% gemeten.

De plasticiteitsindex (PI) ligt voor natuurlijke gronden onder de U-lijn. Hiervoor geldt $PI = 0,90 (w_L - 8\%)$.

Effect op dijkfuncties

Zie consequentie bij afwijking van grenswaarden.

Grenswaarden uit de literatuur

Hoger dan de A-lijn en 18% voor erosie categorie 1 klei [14] en stevige klei [17]. Voor de A-lijn geldt $PI = 0,73 (w_L - 20\%)$.

Hoger dan 18% voor erosie categorie 2 klei [14] en schrale klei [17].

Consequenties bij afwijking van grenswaarden

Bij overschrijding van de grenswaarden voor erosie categorie 1 klei is er onvoldoende weerstand tegen hoge golfbelasting op het buitentalud. Bij overschrijding van de grenswaarden voor erosie categorie 2 klei is er onvoldoende weerstand tegen lage golfbelasting op buitentalud en bij veel overslaand water op het binnentalud. Het positieve effect van een grasbekleding is hierin niet meegenomen [14].

Kwantitatieve verbanden

De plasticiteitsindex heeft een positief lineair verband met het lutumgehalte. Dit is afhankelijk van de minerale samenstelling van de klei, zie figuren 4-50 en -51 van [58].

Er is een verband tussen overslaggebied, erosie categorie, taludhelling en graskwaliteit [71]. Op basis van later onderzoek (overslagproeven) is meer sterkte toegekend aan de grasmatten, maar verder verandert er niets in dit model.

Kwantitatieve verbanden tussen erosie en plasticiteitsindex voor slijterosie van vooral geroerde klei zijn te vinden in [63]. De resultaten van deze studies zijn niet van toepassing op goed gerijpte klei.

Beïnvloeding door uitvoering

Tijdens verschillende fasen van de uitvoering vindt indirect beïnvloeding plaats van de aarde eigenschappen van het gewonnen materiaal. Dit is vooral het geval tijdens de winning en tijdens het verwerken van gewonnen materiaal in het depot. Door de keuze van de winlocatie, de uitkartering van grondlagen binnen de winlocatie en het selecteren van gewonnen partijen is er daardoor grip op deze eigenschap van de grond.

De plasticiteitsindex is niet toestandsafhankelijk, al is deze wel in enigermate gevoelig voor de geschiedenis van de grond (met name drogen). Wanneer de partij eenmaal is geselecteerd en in ophoging is aangebracht, zal deze parameter niet of nauwelijks meer veranderen door grondbewerking. Het is dan ook geen primair doel van grondbewerking om de plasticiteitsindex te beïnvloeden.

2.2 Vloiegrens

Voorkomende waarden

In het NEN-EN-ISO 14688 [10] plasticiteitdiagram kunnen vloiegrenzen tussen 10% en 100% worden geplot. Meestal vallen waarden hierbinnen. In de praktijk zijn echter bij sterk organische kleisoorten uitschieters boven de 100% gemeten.

Effect op dijkfuncties

Zie consequentie bij afwijking van grenswaarden.

Grenswaarden uit de literatuur

Hoger dan 45% voor erosie categorie 1 klei [15] en hoger dan 40% voor stevige klei [17].

Lager dan 45% voor erosie categorie 2 klei [15] en lager dan 40% voor schrale klei [17].

Consequenties bij afwijking van grenswaarden

Bij overschrijding van de grenswaarden van de grenswaarden voor erosie categorie 1 klei kan er onvoldoende weerstand tegen hoge golfbelasting op het buitentalud zijn en is het talud op termijn minder vormvast door veranderingen van microreliëf. Bij overschrijding van de grenswaarden voor erosie categorie 2 klei is er onvoldoende weerstand tegen lage golfbelasting op het buitentalud en bij veel overslaand water op het binnentalud. Bovendien is het talud op termijn vaak niet vormvast bij betreding en gevolgen van maaionderhoud door veranderingen van microreliëf. Het positieve effect van een grasbekleding is hierin niet meegenomen [15]. Voor golfbelasting op het buitentalud kan de grens op basis van voortschrijdend inzicht van 45% omlaag naar 40% [17].

Kwantitatieve verbanden

De vloiegrens heeft een positief lineair verband met het lutumgehalte, zie figuur 4-50 van [58].

Er is een verband tussen overslagdebiet, erosie categorie, taludhelling en graskwaliteit [71]. Op basis van later onderzoek (overslagproeven) is meer sterkte toegekend aan de grasmatten.

Kwantitatieve verbanden tussen slijterrosie en vloiegrens zijn te vinden in [63]. Dit geldt voor vooral geroerde klei en de resultaten van deze studies zijn niet van toepassing op goed gerijpte klei.

Beïnvloeding door uitvoering

Tijdens verschillende fasen van de uitvoering vindt indirect beïnvloeding plaats van de aarde eigenschappen van het gewonnen materiaal. Dit is vooral het geval tijdens de winning en tijdens het verwerken van gewonnen materiaal in het depot. Door de keuze van de winlocatie, de uitkartering van grondlagen binnen de winlocatie en het selecteren van gewonnen partijen is er daardoor grip op deze eigenschap van de grond.

De vloiegrens is niet toestandsafhankelijk. Wanneer de partij eenmaal is geselecteerd en in ophoging is aangebracht, zal deze parameter niet of nauwelijks meer veranderen door grondbewerking. Het is dan ook geen primair doel van grondbewerking om de vloiegrens te beïnvloeden.

2.3 Zandgehalte

Voorkomende waarden

Het maximale zandgehalte van in Nederland voorkomende klei is circa 80% [9].

Effect op dijkfuncties

Op schrale klei (zandgehalte > 40%) kan een grasmat zich sneller ontwikkelen dan op stevige klei, zeker als de toplaag van stevige klei is verdicht en afgereden. De bulkdoorlatendheid van zandige en vette klei is na enige jaren na aanleg vergelijkbaar [8].

Grenswaarden uit de literatuur

Lager dan 40% voor erosie categorie 1 en 2 klei [15] en voor stevige klei [17] en voor klei in een toplaag voor grasbekleding met eventueel licht agrarische doelstelling [60].

Consequenties bij afwijking van grenswaarden

Bij overschrijding van de grenswaarden voor erosie categorie 1 klei kan er onvoldoende weerstand zijn tegen hoge golfbelasting op het buitentalud. Bij overschrijding van de grenswaarden voor erosie categorie 2 klei is er onvoldoende weerstand tegen lage golfbelasting op buitentalud en bij veel overslaand water op het binnentalud. Het positieve effect van een grasbekleding is hierin niet meegenomen [15]. Voor het buitentalud geldt op basis van voortschrijdend inzicht dat er ook bij onderschrijding van de grenswaarde (ofwel schrale klei in plaats van stevige klei) voldoende weerstand is tegen golfbelasting [17]. Dit geldt niet voor afschuiven van het binnentalud door overslag, omdat hierin afschuiven via ondiepe glijvlakken een rol speelt, die afhankelijk is van de cohesie. Schrale klei op het binnentalud is daardoor significant minder erosiebestendig dan stevige klei [16]. Ook effecten op verwerkbaarheid (vervloeien) zijn niet beschouwd.

Op basis van Deltagootproefresultaten is een erosiemodel gepresenteerd met parameters die de erosiesnelheid van een buitentalud door golfbelasting beschrijven [40]. Bij een zandgehalte in klei hoger dan 40% is het model voor erosiesnelheid bij golfbelasting op het buitentalud niet meer toepasbaar. Bij een zandgehalte in keileem hoger dan 60% is dat model voor erosiesnelheid bij golfbelasting op het buitentalud niet meer toepasbaar.

Kwantitatieve verbanden

Er is een verband tussen overslagdebiet, erosie categorie, taludhelling en graskwaliteit [71]. Op basis van later onderzoek (overslagproeven) is meer sterkte toegekend aan de grasmat.

Zandige klei heeft een hogere hoek van inwendige wrijving, stijfheid en gewicht dan niet-zandige klei, maar een lagere cohesie, zie tabel 2b van [72]. In hoeverre deze waarden van toepassing zijn voor klei op een dijktaalud is niet nagegaan. Wel zijn er enkele triaxiaalproeven op grote diametermonsters uitgevoerd, die erop wijzen dat de stevigheid van gerijpte klei aanmerkelijk hoger is dan van niet-gerijpte klei met vergelijkbare samenstelling.

Kwantitatieve verbanden tussen erosie en zandgehalte zijn te vinden in [63] voor vooral geroerde klei en de resultaten van deze studies zijn niet van toepassing op goed gerijpte klei.

Bij een hoog zandgehalte wordt de grofheid en korrelverdeling van het zand relevant. Dit kan worden herleid uit een aerometerproef op het kleimonster, inclusief een zeefanalyse.

Beïnvloeding door uitvoering

Tijdens verschillende fasen van de uitvoering vindt indirect beïnvloeding plaats van de samenstelling van het gewonnen materiaal. Dit is vooral het geval tijdens de winning en tijdens het verwerken van gewonnen materiaal in het depot. Door de keuze van de winlocatie, de uitkartering van grondlagen binnen de winlocatie en het selecteren van gewonnen partijen is er grip op deze eigenschap van de grond.

Bij natte winning kan menging of segregatie van materiaal met verschillende korrelgrootte verdelingen optreden. Dit kan invloed hebben op het zandgehalte van te winnen baggerspecie.

Door menging van grond met verschillende zandgehalten kan het zandgehalte in het depot verder worden beïnvloed. Wanneer de partij éénmaal is geselecteerd en in ophoging is aangebracht, zal deze parameter niet of nauwelijks meer veranderen door groundbewerking. Het is dan ook geen primair doel van groundbewerking om het zandgehalte te beïnvloeden.

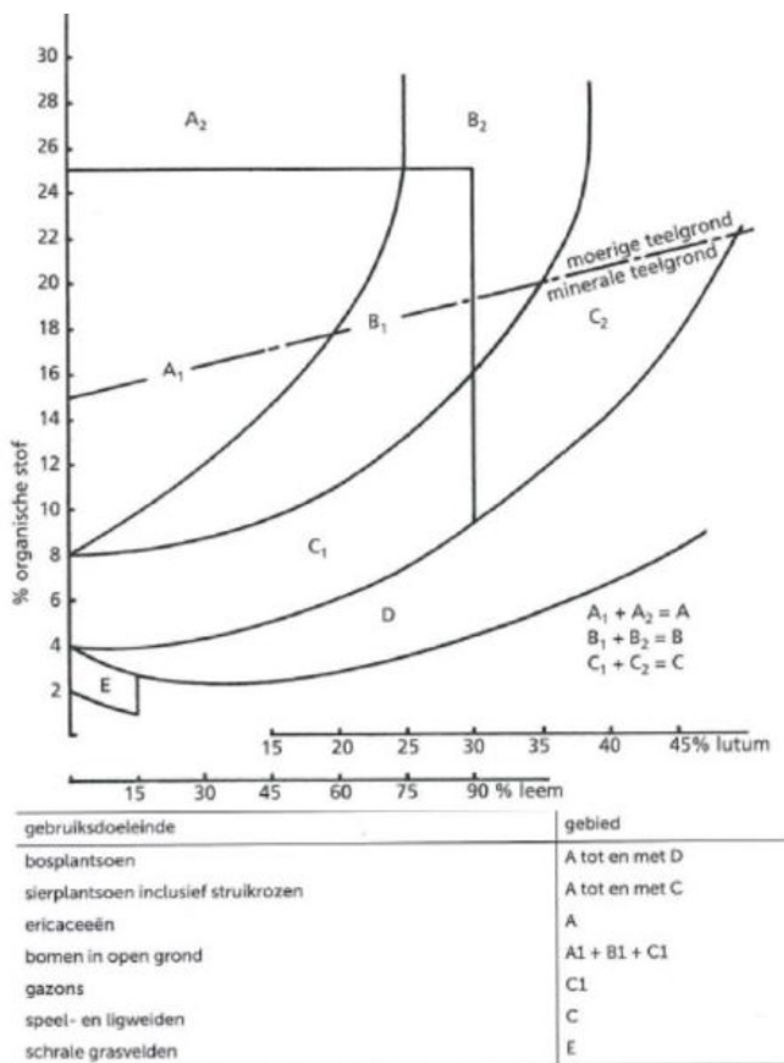
2.4 Organisch stofgehalte

Voorkomende waarden

Volgens NEN 5104 [9] heeft klei een maximaal organisch stofgehalte van 15%. Volgens NEN-EN-ISO 14688 [10] heeft klei een maximaal organisch stofgehalte van 30%.

Direct onder de graszode ontstaat een evenwicht van 3 à 5% organisch stofgehalte [14].

Het organisch stofgehalte van de bovengrond is afhankelijk van de bodemsoort, het bodemgebruikstype en de locatie, zie onderstaande figuur.



Figuur 16 Textuur/organisch stofgehalte in afhankelijkheid van gebruiksdoeleinden [73]

Effect op dijkfuncties

Organisch klei heeft over algemeen een relatief hoge plasticiteitsindex. Voor Nederlandse dijkklei kan dit anders liggen de organisch stof komt in moleculaire vorm voor en als meer of minder vergane plantenresten. Deze maken in Nederlandse klei meer dan 90% van het gewicht van organische stof uit. Deze plantenresten zijn relatief grof en

houden water ingesloten. Daardoor wordt de uitrolgrens verhoogd, waardoor de plasticiteitsindex lager wordt. Dit uit zich er onder andere in dat klei in Nederland regelmatig onder de A-lijn scoort, met name ook klei met resten zodelaag.

Grenswaarden uit de literatuur

Lager dan 5% voor alle dijkklei, indien geen maatregelen worden getroffen [15].

Lager dan 8% indien voor klink wordt gecompenseerd met een extra laagdikte met hetzelfde percentage als het organisch stofgehalte [26].

Voor een grasbekleding met eventueel licht agrarische doelstelling wordt geadviseerd de topklaag samen te stellen uit grond met een organisch stofgehalte van minimaal 2% en maximaal 7% [60].

Consequenties bij afwijking van grenswaarden

Bij een organisch stofgehalte hoger dan 5% kan op termijn volumevermindering door afbraak van organisch materiaal optreden [14].

Op basis van Deltagootproefresultaten is een erosiemodel voor erosie door golfwerking ontwikkeld met parameters, die de erosiesnelheid van een buitentalud door golfbelasting representeren. Bij een organisch stofgehalte groter dan 5% is dat model niet meer toepasbaar [40].

Kwantitatieve verbanden

Organische klei heeft een lagere sterkte, stijfheid en gewicht dan niet-organische klei, zie tabel 2b uit [72].

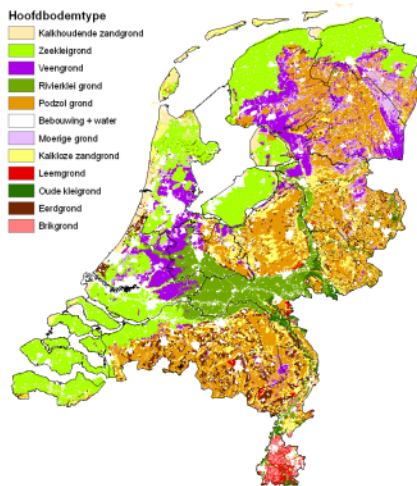
De rijpingsgraad (de n-factor) is een functie van het lutumgehalte, watergehalte en organisch stofgehalte [62].

Kwantitatieve verbanden tussen erosie en organisch stofgehalte zijn te vinden in [63] voor de gelden vooral geroerde klei. De resultaten van deze studies zijn niet van toepassing op goed gerijpte klei.

Beïnvloeding door uitvoering

Tijdens verschillende fasen van de uitvoering vindt indirect beïnvloeding plaats van de samenstelling van het gewonnen materiaal. Dit is vooral het geval tijdens de winning en tijdens het verwerken van gewonnen materiaal in het depot. Door de keuze van de winlocatie, de uitkartering van grondlagen binnen de winlocatie en het selecteren van gewonnen partijen is er grip op deze eigenschap van de grond.

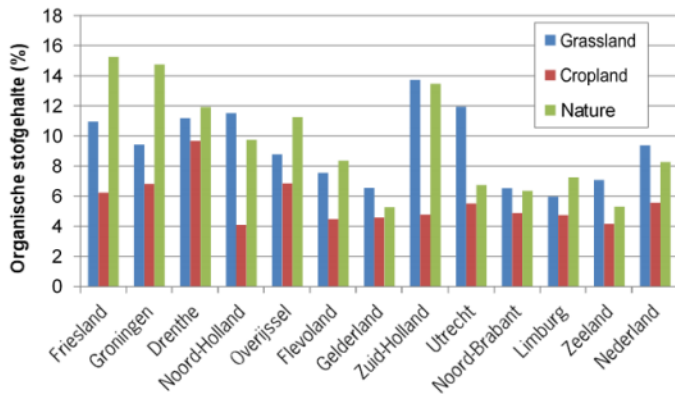
Tijdens rijping zal het organische stofgehalte verder afnemen. Bij de kleirijperijen in Groningen is hier onderzoek naar gedaan. De uitkomsten worden in 2022 verwacht. Tijdens het verwerken in de ophoging zal deze parameter niet of nauwelijks veranderen, de veranderingen verlopen daarvoor te traag. Eenmaal in ophoging zal het rijpingsproces zich voortzetten, afhankelijk van de afstand tot de oppervlakte en de grondwaterstand, en zal het organische stofgehalte zich langzaam naar een evenwichtswaarde aanpassen. Opgemerkt wordt dat bij de courante bepaling van organische stofgehalte in de dijkenbouw er ook andere stoffen verdwijnen (gas, opgelost). Het gehalte hangt daarom mede af van de aard van de klei (ijzerverbindingen, kalk, sulfiden).



Figuur 4. De Nederlandse bodem, onderverdeeld in 11 hoofdbodemtypen (Conijn en Lesschen, 2015).

Tabel 1. Het organische stofgehalte in de Nederlandse bodem per bodemtype en naar de landgebruiksvormen grasland, akkerbouw en natuur. De letters geven significante verschillen weer (naar Conijn en Lesschen, 2015).

| Bodemtype | Totaal | Grasland | Akkerbouw | Natuur |
|------------------------|--------|----------|-----------|--------|
| Kalkhoudende zandgrond | 2.4a | 2.8a | 2.3a | 2.2a |
| Brikgrond | 3.7ab | 3.7a | 3.7a | 4.0a |
| Kalkloze zandgrond | 3.7ab | 4.4b | 3.7b | 2.7a |
| Oude kleigrond | 4.0ab | 4.1a | 4.2a | 3.1a |
| Eerdgrond | 4.3ab | 4.3a | 4.2a | 4.9a |
| Leemgrond | 4.6ab | 4.3ab | 3.6a | 5.9b |
| Zeekleigrond | 5.4ab | 7.1b | 4.2a | 7.0b |
| Podzol grond | 5.6ab | 6.2a | 5.4a | 5.0a |
| Rivierklei grond | 6.7b | 7.1a | 4.4a | 11.7b |
| Moerige grond | 15.5c | 13.8a | 15.8a | 23.6a |
| Veengrond | 26.1d | 24.9a | 21.4a | 42.5b |

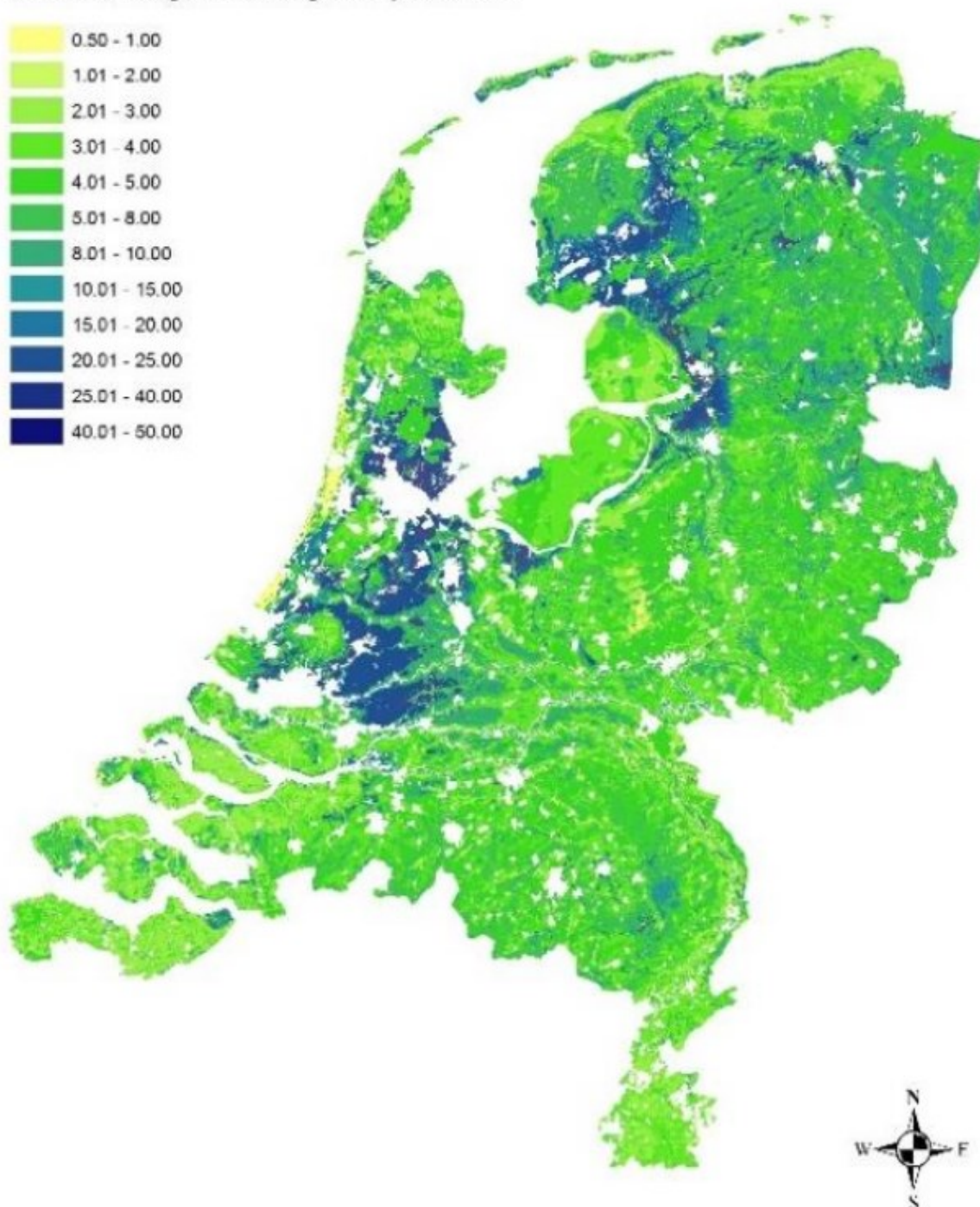
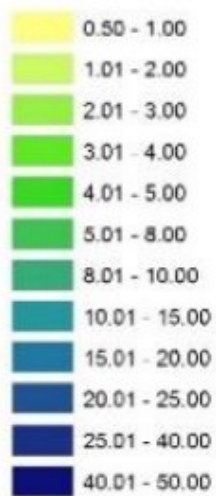


Figuur 5. Organische stofgehalte per provincie en landgebruikstype (naar Conijn en Lesschen, 2015).

Figuur 17 Lutumgehalte in klei en leem in de bovengrond in Nederland [25]

Legenda

Gemiddelde organischestofgehalte per stratum



Figuur 18 Organisch stofgehalte in bovenste 30 cm van bodem in Nederland in 2018 [25]

2.5 Kalkgehalte (gewichtsverlies bij HCl-behandeling)

Voorkomende waarden

Bij zeedijken zijn gewichtsverliezen bij HCl behandeling gemeten van 20 à 30% [74]. Bij dijken in zoetwater omgeving ligt dit gewichtverlies veelal ruim onder de RAW-grenswaarde. Opgemerkt wordt dat bij de courante bepaling van gewichtsverlies bij HCl behandeling in de dijkenbouw er ook andere stoffen verdwijnen dan kalk (gas, opgeloste stof) en het gehalte daarom mede afhangt van de aard van de klei (ijzerverbindingen, sulfiden, organische stoffen).

Effect op dijkfuncties

Zie consequentie bij afwijking van grenswaarden.

Grenswaarden uit de literatuur

Lager dan 25% [15].

Consequenties bij afwijking van grenswaarden

Bij een overschrijding van de grenswaarde van 25% is er duidelijk sprake van klei afwijkende grond [74] en zijn overige eigenschappen niet eenduidig genoeg te beoordelen.

De RAW-eis is opgesteld voor kalk, die van nature in klei voorkomt (o.a. schelpresten). Dit moet niet worden verward met ongebluste kalk, die in kleine hoeveelheden (bijvoorbeeld 2%) wordt toegevoegd aan klei om de stevigheid, verwerkbaarheid en erosiebestendigheid te verbeteren. Deze kalk reageert met water en leidt ertoe dat de kleideeltjes aan elkaar binden met als gevolg een veel hogere erosiebestendigheid. Veel meer ongebluste kalk toevoegen heeft geen zin en kan zelfs contraproductief werken omdat het effect van kleimineralen op de plasticiteit van grond teniet wordt gedaan en de deeltjes gemakkelijk hun onderlinge samenhang verliezen [75].

Kwantitatieve verbanden

Er is modelonderzoek gedaan naar erosiebestendigheid van klei bij zeedijken waarin het kalkgehalte is beschouwd [74].

Kwantitatieve verbanden tussen erosie en kalkgehalte zijn te vinden in [63] voor vooral geroerde klei en de resultaten van deze studies zijn niet van toepassing op goed gerijpte klei.

Beïnvloeding door uitvoering

Zie hiervoor.

Tijdens verschillende fasen van de uitvoering vindt indirect beïnvloeding plaats van de samenstelling van het gewonnen materiaal. Dit is vooral het geval tijdens de winning en tijdens het verwerken van gewonnen materiaal in het depot. Door de keuze van de winlocatie, de uitkartering van grondlagen binnen de winlocatie en het selecteren van gewonnen partijen is er grip op deze eigenschap van de grond.

Bij geringe afwijkingen ten opzichte van de grenswaarde kan menging met andere grond worden overwogen als duidelijk is waar de hoge waarde het gevolg van is. Bij grote afwijkingen is de verwerking een probleem en wordt afgeraden om het materiaal toe te passen.

2.6 Zoutgehalte

Voorkomende waarden

In zeewater komt gemiddeld 34,5 g/l zout voor, waarvan 24 g/l bestaat uit natriumchloride. In zoetwater zit minder dan 0,5 g/l zout [76].

Voor Nederlandse dijken in zoutwateromgeving geldt:

- Klei in de kern van een dijklichaam is tot minstens 1 meter boven gemiddeld hoogwaterniveau zout. De kern wordt geacht de grond op meer dan 1 meter van de buitenkant van de dijk te zijn.
- Klei op het buitentalud van een dijk in het getijdegebied die meer dan ongeveer 1 meter boven gemiddeld hoogwater ligt, heeft een voor plantengroei effectief zoutgehalte van minder dan 4 g/l bodemvocht.
- Klei op het buitentalud van een dijk in het getijdegebied die minder dan ongeveer 1 m beneden gemiddeld hoogwaterniveau ligt, heeft een zoutgehalte van veel meer dan 4 g/l bodemvocht [57].

Effect op dijkfuncties

Wisselende zoet-zoutomstandigheden leiden tot dispergeren (oplossen) van kleideeltjes. Dit is een vorm van erosie [14]. Zoet-zoutwisselingen leiden niet tot een andere sterkte of stijfheid [14]. Zoute klei is ongunstig voor de ontwikkeling van de grasmat [57].

Grenswaarden uit de literatuur

Het zoutgehalte (NaCl) in bodemvocht van klei moet lager zijn dan 8 g/l, mits de grond:

- niet wordt toegepast als bekledingslaag van een buitentalud;
- niet langdurig in contact komt te staan met neerslag;
- wordt aangebracht met een lager watergehalte dan bij de vereiste consistentie-index (3% lager watergehalte bij een vloeigrens van 40%, 5% lager watergehalte bij een vloeigrens van 80%) [57].
- niet als top laag wordt toegepast onder een grasbekleding met eventueel licht agrarische doelstelling [60]

Het zoutgehalte (NaCl) in bodemvocht moet in overige gevallen lager zijn dan 4 g/l [15] [60].

Consequenties bij afwijking van grenswaarden

Bij overschrijding van de grenswaarde kunnen de volgende processen optreden:

- Slijterosie door golven en stroming, vooral bij zoutwater klei in een zoet (neerslag)wateromgeving [15].
- Interne erosie door insijpelen van neerslag met tot meer dan 5% volumeafname tot gevolg [57].
- De ontwikkeling van een grasmat kan worden beperkt (bij een zoutgehalte van 3 g/l kunnen planten als klaver en sommige veelvoorkomende grassoorten niet meer voorkomen en bij 6 g/l kunnen kale plekken in bestaande graszode ontstaan) [57].
- De verwerkbaarheid wordt in het algemeen wat beter doordat de vloeigrens van zoute klei hoger ligt [57].

Kwantitatieve verbanden

Kwantitatieve verbanden tussen erosie en zoutgehalte zijn te vinden in [63] voor vooral geroerde klei en de resultaten van deze studies zijn niet van toepassing op goed gerijpte klei.

Beïnvloeding door uitvoering

Het hoog zoutgehalte in gewonnen materiaal kan worden verlaagd door het materiaal in het depot door regenwater of door kunstmatige bewatering te laten doorspoelen. Het op ruggen zetten of het plaatsens van klei op een drainagebed kan dit proces bevorderen. Bij de kleirijperijs in Groningen is hier onderzoek naar gedaan. De uitkomsten worden in 2022 verwacht.

2.7 Lutumgehalte

Voorkomende waarden

Alle lutumgehaltes hoger dan 8% komen voor in klei [9]. Het lutumgehalte van rivierklei ligt tussen 8 en 80% [13]. Op onderstaande kaart is de verspreiding van het lutumgehalte in klei en leem in Nederland getoond.

Effect op dijkfuncties

Een hoog lutumgehalte zorgt voor een groter waterbindend vermogen. Dit is gunstig voor de verwerkbaarheid van de klei, maar leidt tot meer structuurvorming en kripscheuren bij uitdroging. Structuurvorming leidt tot meer erosie, maar wordt bij dijken vaak effectief voorkomen doordat graswortel aggregaten op hun plek houden. Bij droogte zorgt een hoog lutumgehalte ervoor dat klei erg hard en massief wordt ('gebakken klei'). Door de verminderde lucht- en watertoevoer kan gras zich dan minder goed ontwikkelen, of zelfs afsterven [60]. Een hoog lutumgehalte vergroot de erosiebestendigheid tegen slijterrosie zoals bij lage golf- en overslagbelasting.

Grenswaarden uit de literatuur

Lutumgehalte in onderlagen moet tussen 20 en 35% liggen [74].

Lutumgehalte in substraatlagen moet tussen 10 en 25% liggen [6]. Bij een niet-soortenrijke vegetatie is het voldoende als het lutumgehalte kleiner is dan 35% [57].

Consequenties bij afwijking van grenswaarden

Bij een lutumgehalte lager dan 20% kan de waterdichtheid onvoldoende worden [77] als gevolg van een onvoldoende 'gevuld' mengsel, waardoor er een aaneengesloten netwerk van grotere poriën bestaat. Bij dit lutumgehalte kan verder de erosiebestendigheid onvoldoende gewaarborgd worden [13].

Een lutumgehalte lager dan 8% is sowieso niet toelaatbaar, omdat grond dan conform NEN 5104 niet als klei, maar als zand wordt geclassificeerd [78].

Vanaf 25% kan al sprake zijn van verhoogde structuurvorming, omdat de aanwezige lutum en organische stof dan niet meer in het zandskelet geborgen kunnen worden [13]. Bij een lutumgehalte hoger dan 35% kan er te veel structuurvorming ontstaan [77].

Hoe lager het lutumgehalte in een substraatlaag, hoe beter de doorworteling van een grasbekleding [60]. Dit geldt tot een gehalte waarbij de aanwezige klei nog voldoende water kan leveren voor de vegetatie, wat ook van de ondergrond van het substraat afhangt.

Kwantitatieve verbanden

Het lutumgehalte heeft een positief lineair verband met zowel de vloeigrens als de plasticiteitsindex. Dit is afhankelijk van de minerale samenstelling van de klei, zie figuren 4-50 en -51 uit [58].

De rijpingsgraad is een functie van het lutumgehalte, watergehalte en organisch stofgehalte [62].

Hoe lager het lutumgehalte in een substraatlaag, hoe beter de doorworteling van een grasbekleding en hoe hoger het aantal (zeldzame) soorten in een grasbekleding [60]. Dit geldt tot een bepaald minimumgehalte van het substraat en de onderlaag daarvan.

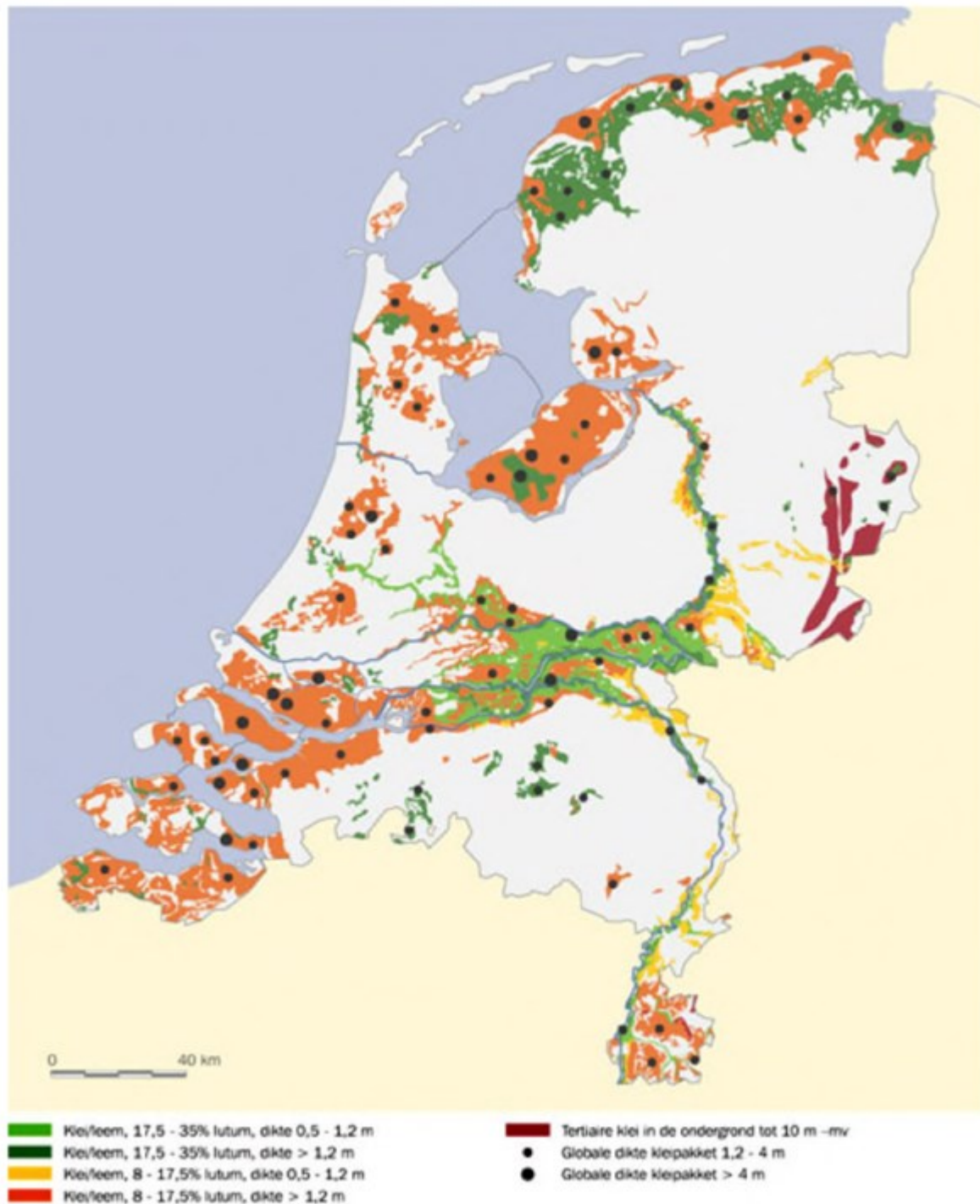
Kwantitatieve verbanden tussen erosie en lutumgehalte zijn te vinden in [63] voor vooral geroerde klei en de resultaten van deze studies zijn niet van toepassing op goed gerijpte klei.

Beïnvloeding door uitvoering

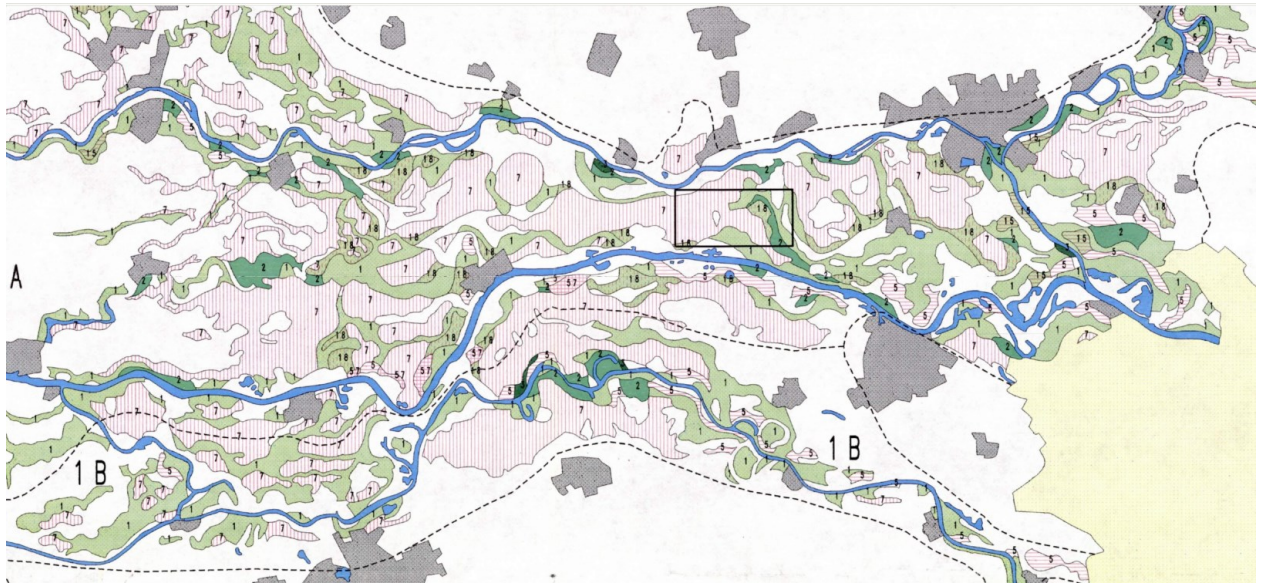
Tijdens verschillende fasen van de uitvoering vindt indirect beïnvloeding plaats van de aardeigenschappen van het gewonnen materiaal. Dit is vooral het geval tijdens de winning en tijdens het verwerken van gewonnen materiaal in het depot. Door de keuze van de winlocatie, de uitkartering van grondlagen binnen de winlocatie en het selecteren van gewonnen partijen is er daardoor grip op deze eigenschap van de grond.

Het lutumgehalte is niet toestandafhankelijk. Wanneer de partij eenmaal is geselecteerd en in ophoging is aangebracht, zal deze parameter niet of nauwelijks meer veranderen door groundbewatering.

Te natte klei met een hoog lutumgehalte (ofwel zware klei) droogt relatief moeilijk. Dit is een reden dat het bij sommige projecten in een dijk wordt verwerkt bij een te lage consistentie-index. Vervolgens treedt dan overmatige structuurvorming op. De oorzaak hiervan moet dan niet worden gezocht in de kleikwaliteit (te hoog lutumgehalte), maar in de uitvoering (te hoog watergehalte).



Figuur 19 Lutumgehalte in klei en leem in Nederland [23]



LEGENDA

Op de kaart zijn aangegeven de klei/leemvoorkomens aan of nabij de oppervlakte met een lutumgehalte $\geq 8\%$, een dikte ≥ 1 meter, een organische stofgehalte $< 5\%$ en zonder noemenswaardige hoeveelheden schelpen

| | | |
|--|----|---|
| | 1 | Klei/leem, % lutum 17,5-35, dikte 1-2 m |
| | 15 | Klei/leem, % lutum 17,5-35, dikte 1-2 m ; onder klei/leem, % lutum 8-17,5 |
| | 17 | Klei/leem, % lutum 17,5-35, dikte 1-2 m ; onder klei, % lutum > 35 |
| | 18 | Klei/leem, % lutum 17,5-35, dikte 1-2 m ; boven klei, % lutum > 35 |
| | 2 | Klei/leem, % lutum 17,5-35, dikte 2-4 m |
| | 25 | Klei/leem, % lutum 17,5-35, dikte 2-4 m ; onder klei/leem, % lutum 8-17,5 |
| | 3 | Klei/leem, % lutum 17,5-35, dikte > 4 m |
| | 5 | Klei/leem, % lutum 8-17,5 |
| | 7 | Klei, % lutum > 35 |
| | 57 | Klei/leem, % lutum 8-17,5 in combinatie met klei, % lutum > 35 |
| | | Stedelijk gebied |
| | | Water |

Figuur 20 Lutumgehalte in klei en leem in Nederland, detailuitsnede rivierengebied, alleen toepasbaar op landelijke schaal [24]

2.8 Verkleuringen, afwijkende geuren en andere inhomogeniteiten

Voorkomende waarden

Extreme verkleuringen bij ontgraven en drogen (helder rood, helder geel, helder blauw of veel zwarte plekken).

Afwijkende sterke geur (rotte eieren, olie- of kolenachtig).

Effect op dijkfuncties

Blaauwe of grijze klei kan duiden op pas ontgraven, natte, plastische klei [14]. Deze heeft een te hoog watergehalte.

Bontgeel en oranjebruine, gevlekte klei ontstaat door veranderingen in de mineralogische en chemische samenstelling (oxidaties van ijzer, aluminium en mangaanverbindingen, vorming van zwavelzuur). De verschijnselen duiden op een oorsprong van de klei waarbij sulfides zijn aangereikt, die een negatieve invloed hebben bij met name rijping en vegetatie hinderen. Deze verkleuringen ontstaan vaak bij zandlenzen en scheuren. Zandlenzen hebben dezelfde effecten als structuurvorming: verhoogde doorlatendheid, lagere erosiebestendigheid, lagere sterkte, snellere veroudering [14]^[60].

Een rotte eierengeur betreft waterstofsulfide en hangt samen met een hoog sulfidegehalte dat vaak weer samenhangt met een hoog organisch stofgehalte en daarbij behorend hoog watergehalte. De oxidatie van de sulfiden leidt tot bovengenoemde negatieve effecten.

Grenswaarden uit de literatuur

Geen extreme verkleuringen bij ontgraven en drogen (helder rood, helder geel, helder blauw of veel zwarte plekken). Geen afwijkende sterke geur (rotte eieren, olie- of kolenachtig). Er zijn geen significante bijmengingen van puin, grind en dergelijke. Er zijn geen inhomogeniteiten, zoals zandconcentraties en zandige lagen [15].

Klei in een toplaag onder een grasbekleding moet vrij zijn van grof of vreemd (granulair) materiaal groter dan 20 mm [60].

Een complicatie is dat termen als extreem, afwijkend en significant subjectief zijn en daarom niet als harde keuringseis kunnen worden gebruikt, maar enkel als aanwijzing dat er iets niet goeds met de klei aan de hand is. Bovendien zijn relevante afwijkingen niet in alle gevallen zichtbaar, omdat anomalieën (bijvoorbeeld stenen of takken) door hun omvang of door onvolledige menging beperkt zichtbaar zijn in kleine grondmonsters. Dit kan worden ondervangen door een bezoek aan het gronddepot.

Consequenties bij afwijking van grenswaarden

Dit is afhankelijk van het type afwijking.

Kwantitatieve verbanden

Dit is afhankelijk van het type afwijking.

Beïnvloeding door uitvoering

Tijdens verschillende fasen van de uitvoering vindt indirect beïnvloeding plaats van de aardeigenschappen van het gewonnen materiaal. Dit is vooral het geval tijdens de winning en tijdens het verwerken van gewonnen materiaal in het depot. Door de keuze van de winlocatie, de uitkartering van grondlagen binnen de winlocatie en het selecteren van gewonnen partijen is er daardoor grip op deze eigenschap van de grond. Rijping van grond met een hoog sulfidegehalte vergt zeer veel tijd.

Materiaal dat niet aan grenswaarden voldoet, zal niet worden geselecteerd en in ophoging worden aangebracht. Lichte, acceptabele afwijkingen zullen tijdens mengen en verknedden bij het aanbrengen verder worden gehomogeniseerd.

3 Verificatiemethode grondgestuurd ontwerpen steilranddijk Ooijen-Wanssum

Binnen de Gebiedsontwikkeling Ooijen-Wanssum (GOW) is met gebiedseigen grond een nieuw type dijk aangelegd: de steilranddijk. Daarvoor zijn technisch uitdagende ontwerpkeuzes gemaakt. Deze case beschrijft hoe deze keuzes effectief naar de eindstreep zijn gebracht met een succesvolle ontwerpverificatie, inclusief bijbehorende uitvoeringsvoorwaarden en een voorspelbare beheerinspanning.

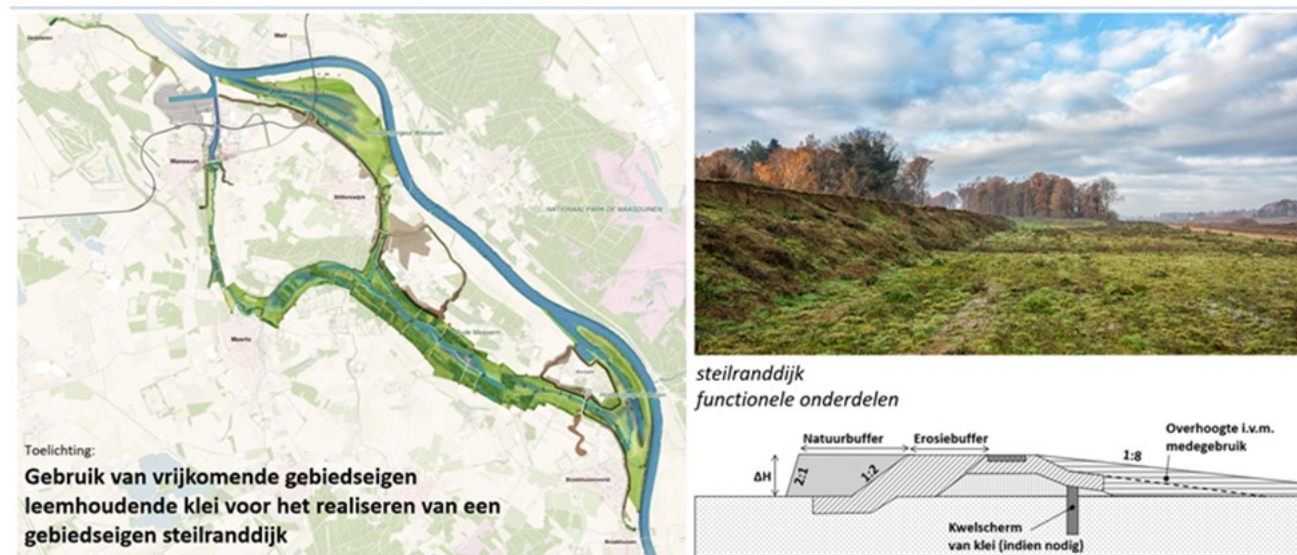
GOW

Gebiedsontwikkeling Ooijen-Wanssum is een integraal project van de provincie Limburg, Rijkswaterstaat, gemeente Venray, gemeente Horst aan de Maas en Waterschap Limburg. De opgave omvat onder andere de aanleg van ongeveer 18 kilometer nieuwe waterkeringen en ontgraving van circa 3,1 miljoen m³ gebiedseigen grond. De uitvoering was in handen van Moeder Maas, een combinatie van Dura Vermeer en Ploegam.

Binnen het GOW-project zijn twee innovatieve en duurzame dijken gerealiseerd: de steilranddijk en de hoge gronddijk. Deze dijken zijn opgebouwd uit gebiedseigen materiaal en besparen meer dan 50% CO₂-uitstoot. Ze zijn zorgvuldig ingepast in het landschap.

Steilranddijk

De steilranddijk biedt maximaal ruimte voor medegebruik voor zowel natuur, recreatie als agrarisch gebruik. Voor deze dijk is een maatwerk aanpak gevolgd om de ontwerpparameters voor de erosiebuffer vast te stellen, zie figuur 1. Voor de hoge gronddijk was dit niet nodig.



Figuur 1 Steilranddijk in project Gebiedsontwikkeling Ooijen-Wanssum

De steilranddijk versterkt het kenmerkende terrassenlandschap langs de Maas met aan de voorkant een natuurbuffer met een steile rand. De natuurbuffer mag zich dynamisch ontwikkelen waarbij natuurlijke erosieprocessen en begroeiing de vorm bepalen. Hierachter ligt de daadwerkelijke waterkering die het achterliggende gebied beschermt tegen hoge waterstanden op de Maas.

De ontwerpverificatie

De vormgeving en dimensionering van de steilranddijk vormden een uitdaging voor de ontwerper. Meer kennis over de eigenschappen van de beschikbare grondsoorten was nodig. Op basis van gebiedskennis en ervaring heeft

de opdrachtgever in de tenderfase ingeschat dat in de gebiedsontwikkeling voldoende klei beschikbaar kwam voor de natuur- en erosiebuffer. Dit is na selectie met grootschalige gootproeven in de fasen van het voorlopig ontwerp (VO) en definitief ontwerp (DO) aangetoond.

Tabel 1 toont het verificatieproces van de steilranddijk, van de voorverkenningfase tot en met de beheerfase.

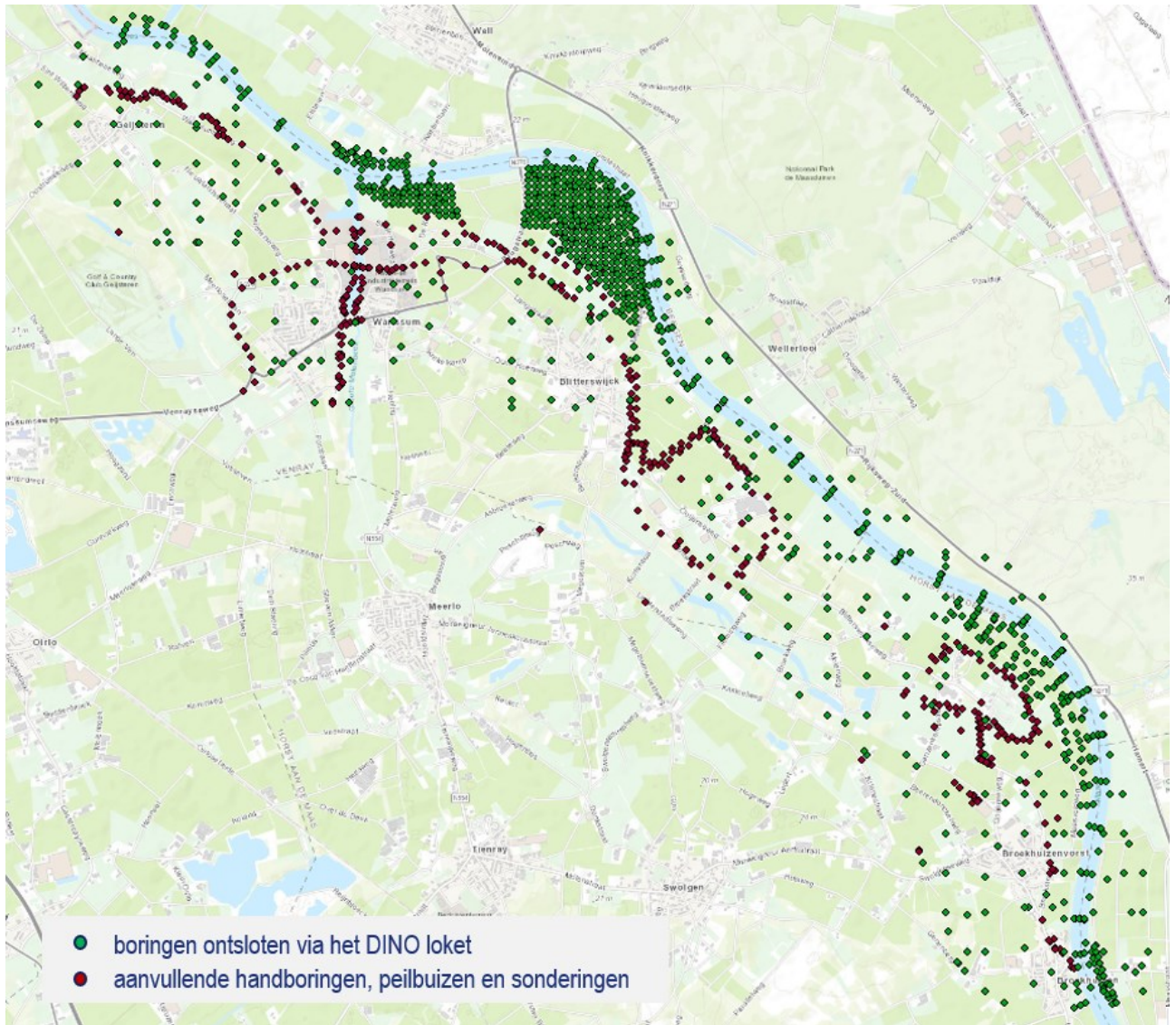
Tabel 1 Stappen in het verificatieproces van de steilranddijk

| Fase | Technische uitdaging | Grondkennis | Oplossing ontwerper/beslisser |
|--|--|--|--|
| Voorverkenningfase OG (tender) | <ul style="list-style-type: none"> • Integrale gebiedsopgave • Veel vrijkomende grond • Relatief laagbelaste dijken | <ul style="list-style-type: none"> • Beperkt onderzoek beschikbaar • Kwaliteiten onzeker • Onduidelijkheid over onzekerheden | <ul style="list-style-type: none"> • Tender integrale gebiedsopgave • Veel ruimte en ontwerprijheid • Toets op maat nodig |
| Verkenningfase ON (voorkeursalternatief) | <ul style="list-style-type: none"> • Afwijkend ontwerp gekozen • Toets op maat nodig • Onafhankelijke check vereist | <ul style="list-style-type: none"> • Gebiedskennis leemhoudende klei • Erosiesterkte is ontwerpbepalend • Aanvullend grondonderzoek | <ul style="list-style-type: none"> • Schetsontwerp steilranddijk • Robuuste erosiebuffer • Extra natuurbuffer |
| Planuitwerkingsfase ON (ontwerp) | <ul style="list-style-type: none"> • Verificatie grondgestuurd ontwerp • Kennis en ervaring beheerder • Onafhankelijke review | <ul style="list-style-type: none"> • Classificatie (uitgebreid, pinhole) • Erosieparameters (gootproeven) • Uitvoeringstolerantie (dichtheid) | <ul style="list-style-type: none"> • Opbouw dwarsprofiel • Kleikeuze en dimensionering • Verouderingsmarge (scenario's) |
| Realisatiefase ON (oplevering) | <ul style="list-style-type: none"> • Opleveren veilige dijk • Opleveren onderhoudbare dijk | <ul style="list-style-type: none"> • Proefophoging (effect slecht weer) • Keuringsplan en classificatieprotocol • Testvak aan de Maas | <ul style="list-style-type: none"> • Uitvoeringsplan en toleranties • Beheer- en onderhoudconcept • Nazorg |
| Beheerfase OG (beoordeling) | <ul style="list-style-type: none"> • Andere randvoorwaarden • Andere beoordelingsregels | <ul style="list-style-type: none"> • Inspectie en monitoring • Ervaring zomerhoogwater 2021 | <ul style="list-style-type: none"> • Beheergrenzen • Interventiegrenzen • Maatregelen |

Onderzoeken naar de erosieparameter

Het klassieke ontwerp van een rivierdijk met een kleibekleding inclusief grasmat is voor de steilranddijk vervangen door een verholde dijklichaam met een robuuste erosiebuffer van klei. De bepalende parameter voor de dimensionering van de erosiebuffer is de erosieparameter C_{klei} (erodeerbaarheid onder golfaanval). De kering wordt belast door golven (ontwerp golfhoogte 0,4 m) en stroming (stroomsnelheid 1,4 m/s).

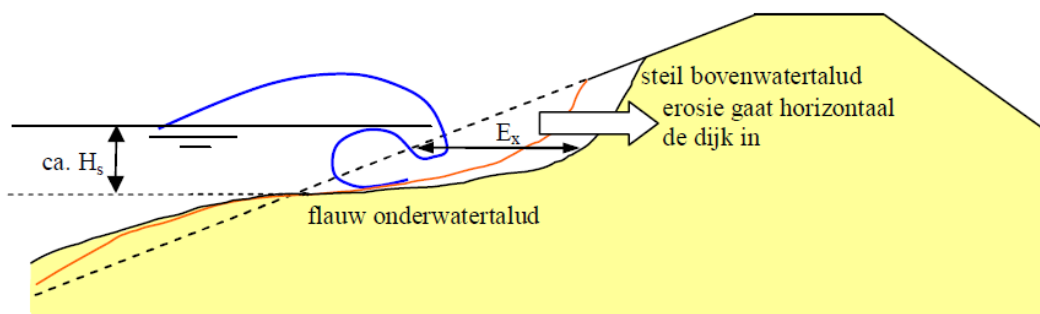
Er is eerst een schetsontwerp gemaakt met eerste inschattingen (*expert judgement*) van de grondeigenschappen. Daaruit bleek dat voor het ontwerp circa 0,4 miljoen m³ erosiebestendige grond nodig was. Uit bestaand grondonderzoek (Dinoloket) bleek dat voor de gebiedsontwikkeling voornamelijk leemhoudende grond zou worden ontgraven. De opdrachtgever heeft aanvullend grondonderzoek uitgevoerd om de erosiebestendigheid van de vrijkomende grond in te schatten (figuur 2). Na gunning zijn grootschalige gootproeven gedaan ter verificatie van de erosiebestendigheid.



Figuur 2 Door opdrachtgever beschikbaar gesteld grondonderzoek.

Gootproeven

Het programma Sterkte & Belastingen Waterkeringen (SBW) van Rijkswaterstaat heeft in 2009 Deltagootproeven gedaan naar de benodigde, horizontale erosielengte (E_x), (zie figuur 3). Dit heeft de volgende formule opgeleverd: $E_x = 1,5 \cdot C_{klei} \cdot H_s \cdot \sqrt{t}$. Hierin is 1,5 de veiligheidsfactor voor ontwerp, C_{klei} (-) de erosieparameter voor de kleisoort, H_s (m) de significante golfhoogte en t (uur) de tijdsduur.



Figuur 3 Geschematiseerd erosieprofiel Deltagootproeven SBW 2009

De erosieparameter C_{klei} (-) is in het SBW-onderzoek voor een aantal kleisoorten vastgesteld, maar niet voor de kleisoorten in het projectgebied. De erodeerbaarheid van de gebiedseigen klei is onderzocht met 1 op 1 golfgootonderzoek (Hannover 2017). Hierin is ook het toepassingsgebied voor de SBW-formule gecontroleerd voor een kleinere golfhoogte en een steiler talud, zoals bij de steilranddijk. Daarnaast zijn kantelgootproeven uitgevoerd (Braunschweig 2017) om de erosiebestendigheid onder stroming vast te stellen en pinhole testen om de grond te testen op dispersief gedrag en bestendigheid tegen interne erosie (piping).

De leemhoudende grond is geclassificeerd als klei, uiterst siltig met een zandpercentage tot ruim 40%, bestaand uit zeer fijn zand. Onderscheid is gemaakt in klei A, B en C. Klei A en B kunnen worden toegepast in de functionele onderdelen van de waterkering: de erosiebuffer, de bekleding en eventueel voor een kleischerm onder de dijk. De schralere klei C biedt meer kansen voor ontwikkeling van natuur en kan als kernmateriaal en in de natuurbuffer worden toegepast.

In tabel 2 zijn de onderzoeksresultaten samengevat van klei A en B. Figuur 4 toont enkele proefopstellingen.

Tabel 2: In-situ en laboratoriumonderzoek eigenschappen leemhoudende klei A en B

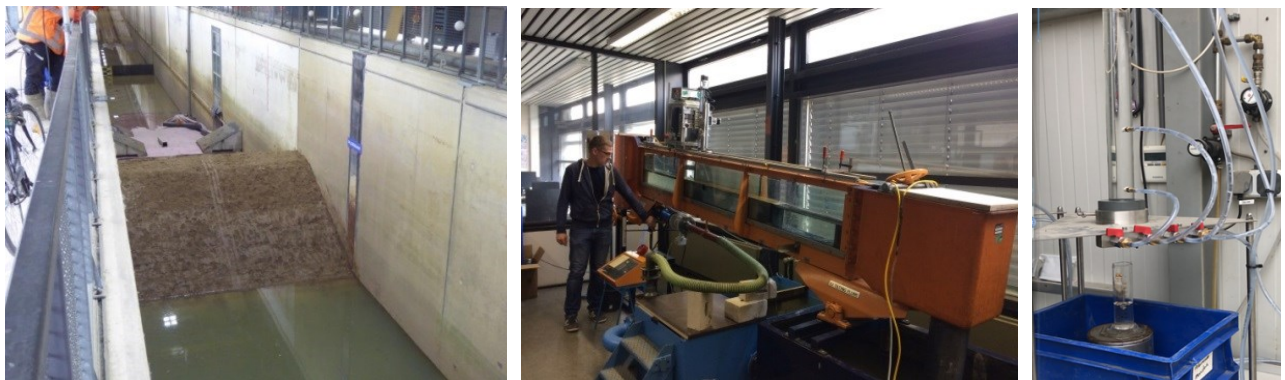
| Proef | Parameter | | Klei A (vet) | Klei B (zandig) |
|---|------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|
| Classificatie (samenstelling en consistentie) | Zandgehalte | (% m/m) | 5,9 | 41,5 |
| | Lutumgehalte | (% m/m) | 26,2 | 16 |
| | Vloeigrens | w_l (% m/m) | 46 | 36 |
| | Plasticiteitsindex | I_p (% m/m) | 22 | 18 |
| | Optimum watergehalte | w_{opt} (% m/m) | 23,6 | 14 |
| | Maximum watergehalte deklaag | $w_{max;d}$ (% m/m) | 29 | 23 |
| | Maximum watergehalte kern | $w_{max;k}$ (% m/m) | 32 | 26 |
| | Gehalte organische stof | (% m/m) | 1,7 | 1,6 |
| | Erosiecategorie | (cat. I, II of III) | I | II/III |
| Golfgootproef | Erosieparameter | C_{klei} (-) | 0,07 (97% EPD) | 0,10 (96% EPD) |
| | | | 2,19 (85% EPD) | 0,18 (98% EPD) |
| Kantelgootproef (stroomgoot) | Kritieke stroomsnelheid | $U_{crit;pr}$ (m/s) | >1,9 | >1,9 |
| Pinhole test (verticaal) | Cumulatieve doorlooptijd | (s) | 1000 s | 700 s |
| | Vallende deeltjes | (-) | nauwelijks | zeer beperkt |
| | Verkleuring eluaat | (-) | nauwelijks | zeer beperkt |
| Triaxiaalproef (gedraineerd) | Hoek van inwendige wrijving | ϕ' (°) | 24 | 28 |
| | Cohesie | c' (kPa) | 7 | 6 |

Toelichting bij tabel 2:

- Classificatie** De materialen zijn beoordeeld met de standaard classificatietesten. Op basis hiervan zou klei A worden ingedeeld in erosieklasse I (erosiebestendig) en klei B in erosieklasse II/III (matig tot weinig erosiebestendig). Dit laatste lijkt te conservatief gezien de gebiedservaring, wat later ook is bevestigd met gootproeven.
- Golfgootproef** De golfgootproeven zijn in tweevoud uitgevoerd, op werkelijke schaal met een talud 1:2, waarbij de tweede proef telkens met een lagere verdichtingsgraad (< 98% eenpuntsproctordichtheid (EPD)). Klei A met 85% EPD bleek significant minder erosiebestendig door een te lage verdichtingsgraad. In de andere proefresultaten was de erosieparameter (dus ook de erosiesterkte) minstens gelijkwaardig aan de waarden voor vette of schrale klei uit het SBW-onderzoek.
- Kantelgootproef** Klei A en B zijn in een kantelgoot getest bij de maximum stromingscapaciteit 1,9 m/s tijdens 13 uur, bij een waterdiepte 0,05 m in de gekantelde goot. Geen van de materialen liet noemenswaardige erosie zien.
- Pinhole test** De pinhole test wordt gebruikt voor de identificatie van dispersieve grond. Hiervoor is een experimentele, verticale opstelling van Fugro gebruikt, afgeleid uit ASTM D4647 (horizontale

opstelling). Het betrof een doorlatendheidsproef op een grondmonster van 50 mm hoog met bekende samenstelling, verdichtingsgraad en watergehalte, met een initieel gat 1 mm diameter, bij opeenvolgende 50, 180, 380 en 1020 mm waterkolomhoogten, waarbij de doorlooptijd is bepaald bij 10, 25, 50 en 100 ml doorstroomd volume. De cumulatieve doorlooptijd is een maat voor de erosiebestendigheid, net als tijdens de proef waargenomen verschijnselen, zoals vallende delen en verkleuring van het eluaat. Er is geen onacceptabel dispersief gedrag geconstateerd. Klei A blijkt bestendiger te zijn tegen interne erosie dan klei B.

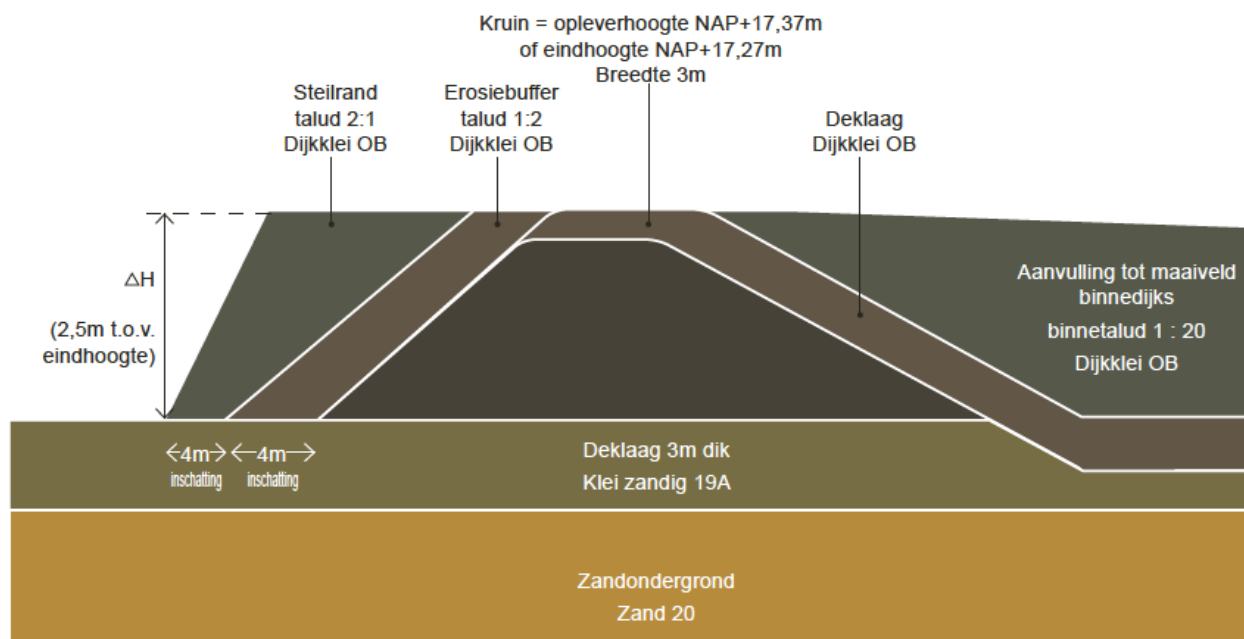
Triaxiaalproef In veel erosieformules onder stroming wordt de cohesie gebruikt als indicator. Beide materialen hebben ongeveer eenzelfde cohesie, dus naar verwachting een vergelijkbare erosiebestendigheid onder stroming. Dit bevestigt het beeld uit de golfgoot- en kantelgootproeven.



Figuur 4 Proefopstellingen golfgoot Hannover, kantelgoot Braunschweig en pinhole test Fugro Arnhem

Ontwerpwaarden voor ontwerpverificatie

Figuur 5 geeft een ontwerpprofiel met de opbouw en dimensionering van de steilranddijk (Ontwerpprotocol 2017). Hierna is toegelicht hoe de onderzoeksresultaten stapsgewijs zijn vertaald naar ontwerpwaarden en veiligheidsmarges voor de ontwerpverificatie.



Figuur 5 Opbouw en dimensionering van de steilranddijk

Veilige lengte erosiebuffer

- Voor de bepaling van de lengte van de erosiebuffer is een erosieparameter nodig die bij gestructureerde klei A of B hoort, die na aanleg door verouderingsprocessen zal ontstaan. Het is echter niet eenvoudig om gestructureerde klei in een golfgoot in te bouwen en te testen. Daarom wordt voor gestructureerde klei aangesloten bij parameters uit het SBW-onderzoek.
- De grootschalige gootproeven zijn uitgevoerd op klei met de eigenschappen direct na uitvoering, wanneer er nog geen structuurvorming is opgetreden. De golfgootproeven geven voor ongestructureerde klei A en B (bij voldoende verdichtingsgraad) gunstiger waarden dan de SBW-waarden. Voor het ontwerp worden veiligheidshalve de SBW-waarden aangehouden, dat wil zeggen: $C_{\text{klei}} = 0,10$ voor ongestructureerde vette klei en $0,40$ voor schrale klei. Met de proeven is ook aangetoond dat de SBW-ontwerpp formule geschikt is voor het ontwerp van de erosiebuffer met een talud 1:2, onder relatief beperkte golfaanval (significante golfhoogte $0,4$ m), zoals van toepassing op de steilranddijk in het GOW-project.
- Op basis van deze classificatie is uitgegaan van dezelfde eindconditie voor gestructureerde of vette klei in het SBW-onderzoek. Ongeacht de aanvangsconditie blijken de verschillende kleisoorten allemaal ongeveer eenzelfde gestructureerde eindconditie te bereiken: $C_{\text{klei}} = 0,85$ à $1,25$.
- In verband met de geringe onderlinge verschillen en om eventuele heterogeniteit in de materiaaleigenschappen mee te tellen, wordt een $C_{\text{klei}} = 2,0$ gehanteerd als veilige bovengrens.
- Voor een robuust ontwerp is hier bovenop een veiligheidsfactor van $1,5$ toegepast. Dit resulteert in een minimaal benodigde (ontwerp)lengte van $4,5$ m voor de erosiebuffer.

Stromingsbestendigheid

- Voor belasting door stroming wordt het ontwerp gecontroleerd op begin van erosie, dat wil zeggen: de kritieke stroomsnelheid, bij een representatieve waterdiepte $1,0$ m en ontwerp stroomsnelheid $1,4$ m/s.
- De kritieke dieptegemiddelde stroomsnelheid $1,9$ m/s bij een waterdiepte $0,05$ meter in de kantelgoot komt overeen met $2,9$ m/s voor een waterdiepte $1,0$ m in het project (erosieformule voor cohesieve materialen, Mirtskhoulava, Scour manual 1997).
- Voor structuurvorming wordt een reductiefactor 2 gehanteerd (Hoffmans 2012).
- Voor het ontwerp is daarom een kritieke snelheid $1,4$ m/s aangehouden voor gestructureerde klei A en B. Hiermee is aangetoond dat het ontwerp voldoet.

Uitvoeringskwaliteit

Als vervolg op de gootproeven zijn uitvoeringsproeven uitgevoerd, onder andere in een periode met zware neerslag. Dit met het doel om het classificatieprotocol voor projectspecifieke klasse-indeling kleimaterialen te testen en een uitvoerings- en keuringsprotocol vast te stellen waarmee de vereiste uitvoeringskwaliteit (verdichtingsgraad) wordt behaald. Dit betrof ook een maakbaarheidsproef voor kleischermen als kwelscherm.

Beheerinspanning

In de realisatiefase is een 1 op 1-model van de steilranddijk langs de oever van de Maas gerealiseerd. Door gebruik te maken van verschillende gebiedseigen materialen, de belasting door de rivier en het dijkprofiel te monitoren is inzicht verkregen in de beheerinspanning. Tijdens het zomerhoogwater juli 2021 zijn de steilranddijken voor het eerst hoog belast (figuur 6), maar is nauwelijks enige erosie ten gevolge van het hoogwater geconstateerd. Daarnaast zal de beheerder met name de eerste jaren nog ervaring moeten opdoen met het beheer van de natuurbuffer. Omdat enige erosie van de natuurbuffer is voorzien en ook toelaatbaar is, geeft dit de beheerder de ruimte om hier ervaring mee op te doen.



Figuur 6 Eerste hoge belasting van de stijranddijk tijdens hoogwater juli 2021 (Bron: Paul Poels Fotografie)

Wettelijke beoordeling

In de wettelijke beoordeling gelden andere randvoorwaarden dan in het ontwerp en ook het instrumentarium is doorontwikkeld. Er is een beoordelingsaanpak conform WBI opgesteld, waarmee de beheerder toekomstige beoordelingen mee kan (laten) uitvoeren. Hiermee kan de beheerder anticiperen op veranderende randvoorwaarden en uitgangspunten. Omdat het ontwerp een ruime veiligheidsmarge heeft, zal dit naar verwachting niet snel tot problemen leiden.

Bronnen

- Onderzoeksprogramma Sterkte en Belastingen Waterkeringen (SBW)-reststerkte, fase 1 inventarisatie, deel 6 reststerkte van de kleilaag, Deltares 1200393-002-HYE-0010, 2 november 2009.
- Physical model erosion test on loam material under wave action, Forschungszentrum Küste, Hannover, May 2017.
- Experimental investigation of incipient motion and areal erosion of cohesive soils – Summary of results for soils A to D, Technische Universität Braunschweig, May 2017.
- Scour manual, G.J.C.M. Hoffmans en H.J. Verheij, January 1997.
- Influence of Turbulence on Soil Erosion, G J.C.M. Hoffmans, Eburon Delft, 2012.
- Ontwerpprotocol Groene waterkeringen, Gebiedsontwikkeling Ooijen-Wanssum, Moeder Maas, 2017.

4 Reviews

Er zijn voor het opstellen van dit document verschillende review rondes geweest, in onderstaand overzicht zijn de reviewers opgenomen. Tevens zijn de leden van de klankbordgroep opgenomen waarmee afstemming is geweest.

| Leden klankbordgroep, en reviewers van ruwbouw, februari 2021 en eindconcept september 2022 | |
|---|--------------------------|
| Bernadette Wichman | Review |
| David-Jan Smeenge | Klankbordgroep en review |
| Emiel Boerma | Review |
| Erik Jolink | Klankbordgroep en review |
| Gerard van Meurs | Klankbordgroep |
| Gerard Kruse | Review |
| Gerry Schoonen | Klankbordgroep |
| Harm Rinkel | Review |
| Henk van Norel | Review |
| Jan-Willem Nieuwenhuis | Klankbordgroep en review |
| Jos Wieggers | Klankbordgroep |
| Kees Dorst | Review |
| Marco Veendorp | Klankbordgroep |
| Marinus Aalberts | Review |
| Mathijs Bos | Klankbordgroep en review |
| Maurits van Dijk | Klankbordgroep |
| Michelle van Duin | Klankbordgroep |
| Myron van Damme | Klankbordgroep |
| Paul Neijenhuis | Klankbordgroep |
| Pieter de Boer | Klankbordgroep en review |
| Regina Havinga | Klankbordgroep |
| Renee Rookus | Klankbordgroep |
| Richard de Boer | Klankbordgroep en review |
| Robbert Bruin | Klankbordgroep |
| Roos van Rhijn | Klankbordgroep |
| Roy Hendriks | Klankbordgroep |
| Saskia van Vuren | Klankbordgroep |
| William van Ruiten | Klankbordgroep en review |
| Xander de Gans | Klankbordgroep |