

Waterschap NOORDERZIJLVEST



HWBP
voor sterke dijken

Deltares **FUGRO**



Erodeerbaarheid klei van Waddenzeedijken

Kwantificering erodeerbaarheid met eenvoudig te meten eigenschappen

Mark Klein Breteler, Deltares

Onderzoek Erodeerbaarheid Klei (OEK)

1. Deltagootproeven (Waddenzeedijken):
 - a) Klei uit kleilaag
 - b) Klei uit kleikern
2. Nieuwe erosieformule
3. Voorlopige methode voor bepaling kleikwaliteit:
 - Bestaande dijk
 - Kleidepot voor dijkversterking
4. Verificatie (2025)

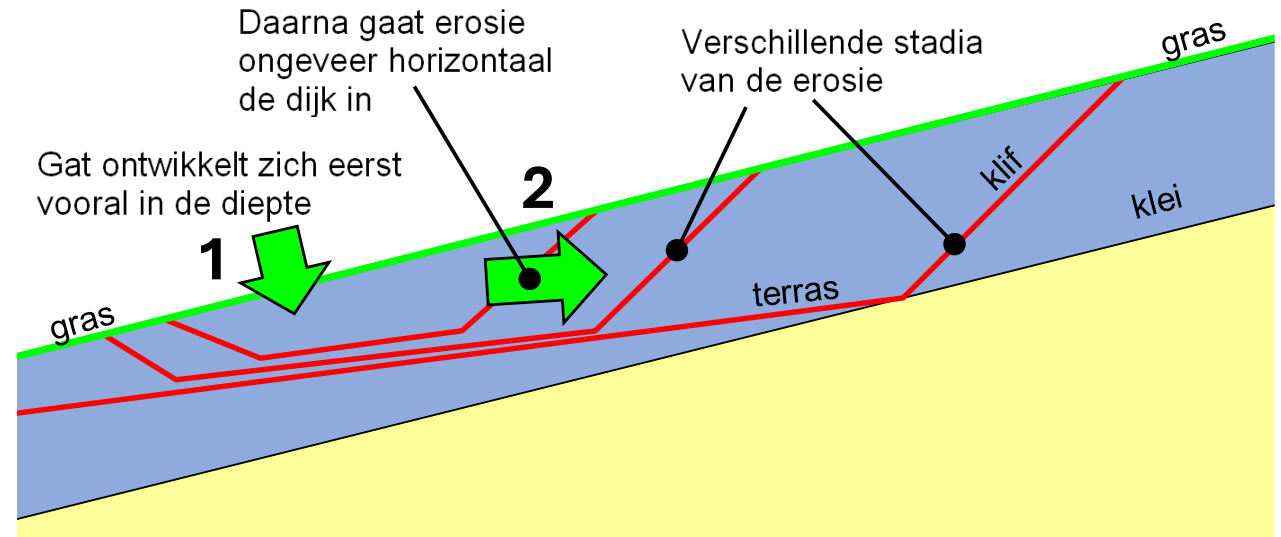


Omdat TAW (1996) met de 3 categorieën niet voldoet bij golfbelasting.

Nieuwe erosieformule

Gericht op fase 2 van erosieproces:

- Deltagootproeven uit 3 projecten
- OpenFOAM sommen



Nieuwe erosieformule

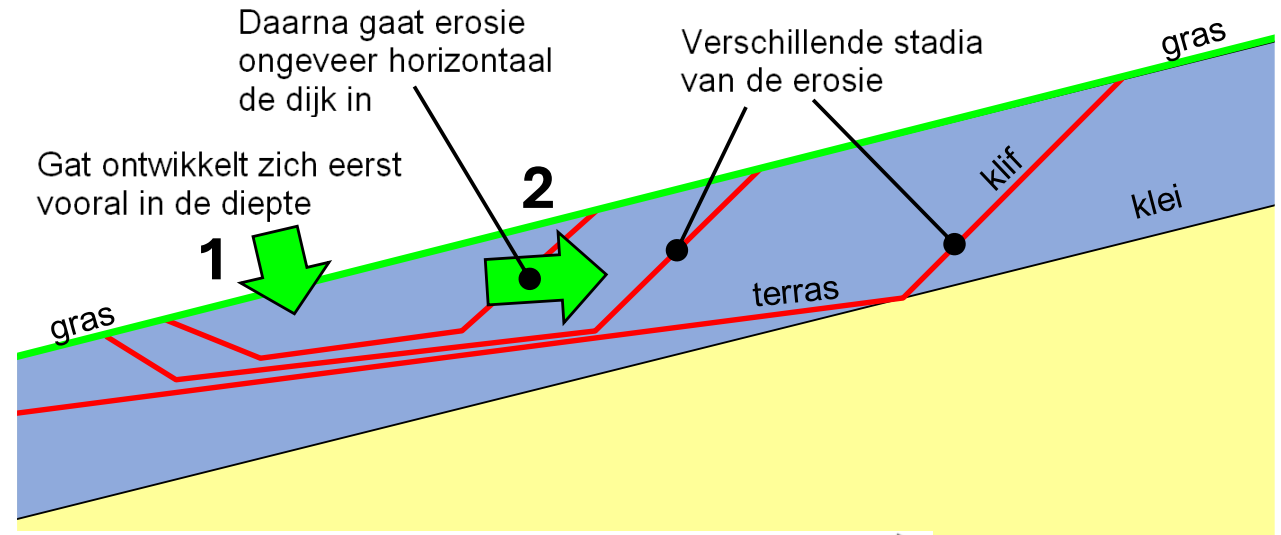
Gericht op fase 2 van erosieproces:

- Deltagootproeven uit 3 projecten
- OpenFOAM sommen

Erosievolume (m³/m) =

$$V_e = t_{belast} \cdot \frac{C_{fase2}}{T_p} \cdot \left(f_{overgang2} \cdot f_{berm} \cdot \frac{(\tan \alpha)^{0,7}}{s_{op}} \cdot H_{m0}^{1,5} \cdot e^{-0,5 \cdot \left(\frac{h_{klif}}{H_{m0}} - 0,3 \right)^2} - 2,70 \right)$$

$$f_{overgang} = \max \left(0,3; \min \left(2,23; 2,00 \frac{h_{overgang}}{H_{m0}} + 1,45 \right) \right) \quad f_{berm} = \max \left(1; \max \left(0,7; -0,1 \frac{B_{berm}}{H_{m0}} + 1,1 \right) \right)$$



Nieuwe erosieformule

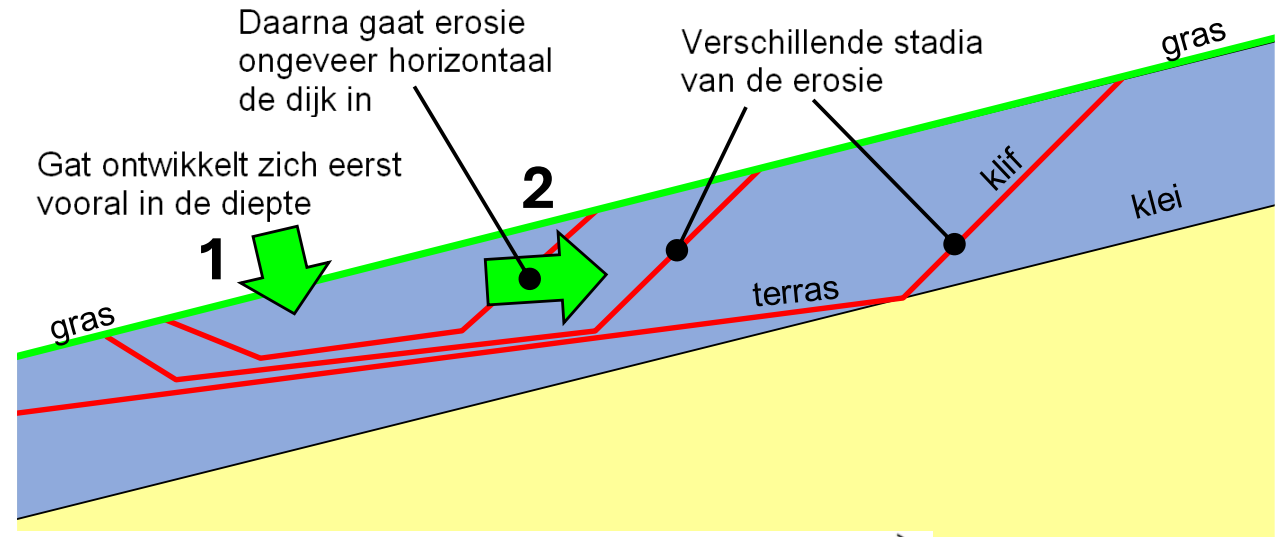
Gericht op fase 2 van erosieproces:

- Deltagootproeven uit 3 projecten
- OpenFOAM sommen

Erosievolume (m³/m) =

$$V_e = t_{belast} \cdot \frac{C_{fase2}}{T_p} \cdot \left(f_{overgang2} \cdot f_{berm} \cdot \frac{(\tan \alpha)^{0,7}}{s_{op}} \cdot H_{m0}^{1,5} \cdot e^{-0,5 \cdot \left(\frac{h_{klif}}{H_{m0}} - 0,3 \right)^2} - 2,70 \right)$$

$$f_{overgang} = \max \left(0,3; \min \left(2,23; 2,00 \frac{h_{overgang}}{H_{m0}} + 1,45 \right) \right) \quad f_{berm} = \max \left(1; \max \left(0,7; -0,1 \frac{B_{berm}}{H_{m0}} + 1,1 \right) \right)$$



Erosiecoëfficiënten op basis van Deltagootproeven

- Kleibekleding met gras op boventalud:

- Holwerd $C_{\text{fase2}} = 0,065$
- Blija2020 $C_{\text{fase2}} = 0,19$
- Lauwersmeerdijk $C_{\text{fase2}} = 0,20$

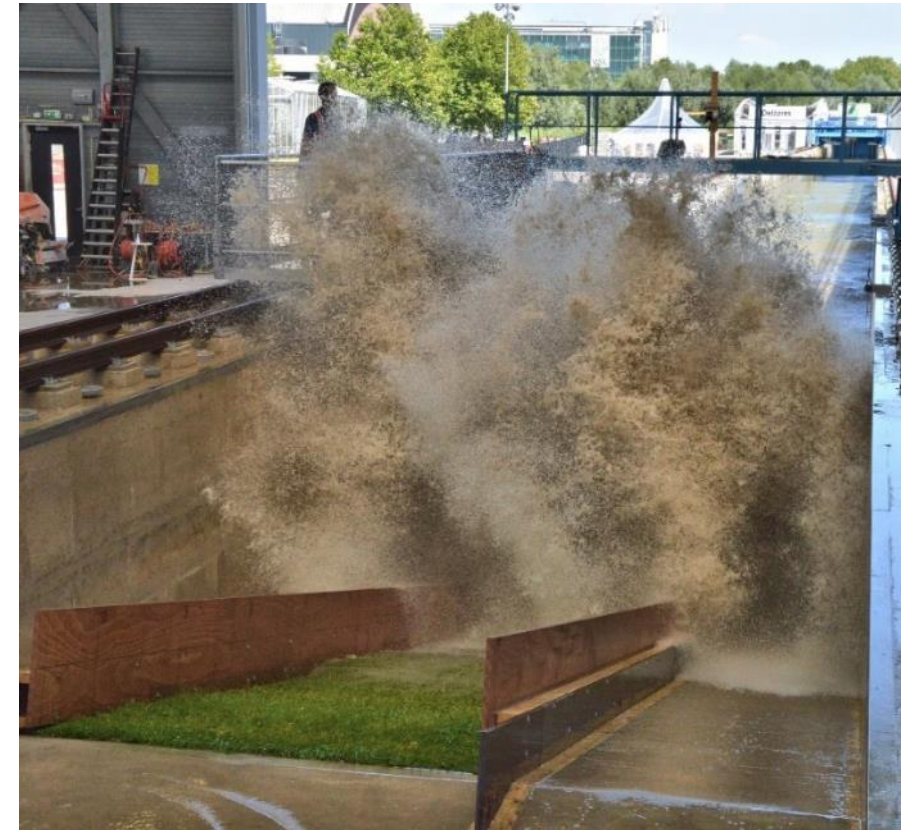
- Brede Groene Dijk:

- Blija2021 $C_{\text{fase2}} = 0,22$
- Dollarddijk-west $C_{\text{fase2}} = 0,30$
- Klutenplas $C_{\text{fase2}} = 0,31$
- Valgenweg $C_{\text{fase2}} = 0,42$

- Dubbele Dijk

- Deklaag $C_{\text{fase2}} = 0,79$
- Kleikern $C_{\text{fase2}} = 0,79$

Hoe groter C_{fase2} , hoe groter de erodeerbaarheid, hoe meer erosie bij golven

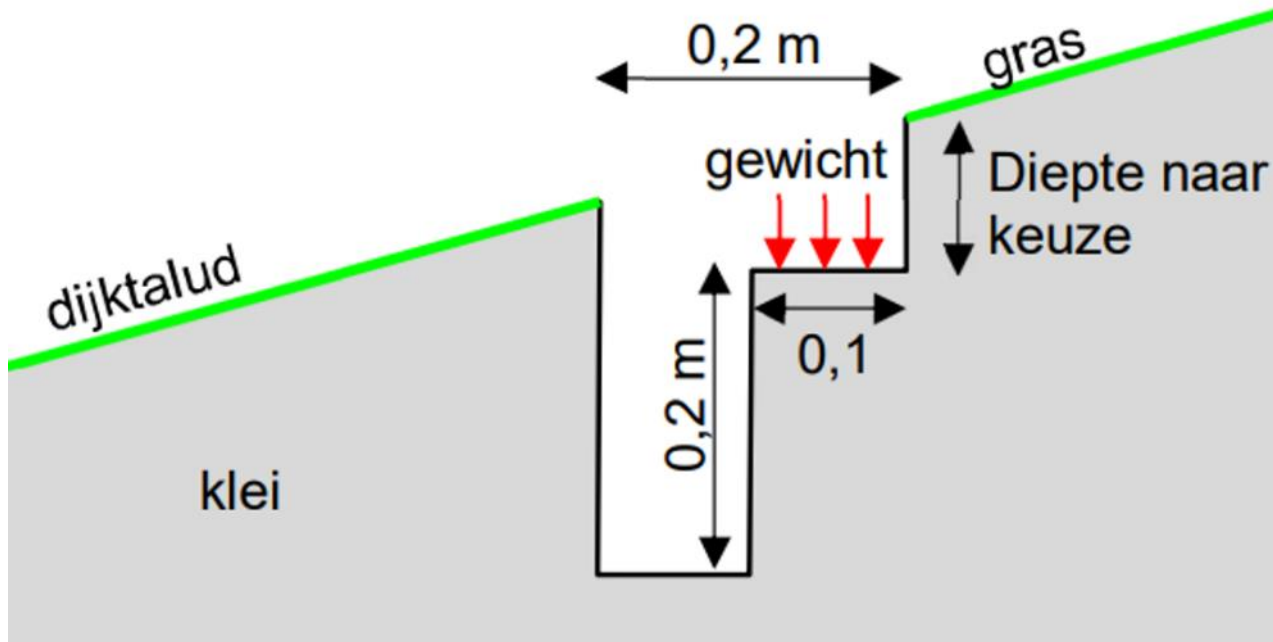


Selectie eenvoudige karakteriseringsproeven

1. Profielkuil: gestructureerdheid (methode Hijma)
2. WBI-criteria
 - 2.1 Vloeigrens, uitrolgrens en plasticiteitsindex
 - 2.2 Lutum en zandgehalte
 - 2.3 zoutgehalte bodemvocht
 - 2.4 kalkgehalte (HCl)
 - 2.5 organisch stof gehalte (waterstofperoxide)
 - 2.6 watergehalte
3. 5-punts Proctorproef en actuele bulkdichtheid
4. Pycnometerproef (dichtheid korrels)
5. Specifiek oppervlak kleideeltjes
6. Mineralogisch onderzoek mbv XRD
7. Kationbezetting van adsorptiecomplex
8. Krimprens
9. pF-curve, lab
10. Steile Wand Test (SWT)
11. Roto-erosiometer (RETA)
12. Jet Erosion Test (JET)
13. Pocket Erodrometer Test (PET)



Steile Wand Test en Pocket Erodrometer Test



Gekozen eigenschappen / proeven

Eigenschap	Stap 1	Stap 2
Consistentie-index	x	x
Droge dichtheid	x	x
Dichtheid korrels (Pycnometerproef)		x
Steile Wand Test		x
PET-proef, gemiddelde waarden		
PET-proef, standaardafwijking	x	x
Zandgehalte	x	

Methodiek voor bepaling erodeerbaarheid

Stap 0: Valt de klei in het toepassingsgebied?

- $30\% < \text{vloeigrens} < 90\%$
- $12\% < \text{plasticiteitsindex} < 60\%$
- $15\% < \text{lutumgehalte} < 50\%$
- Zandgehalte $< 45\%$
- Organisch stof gehalte $< 7\%$
- **Klei uit Waddengebied**
- Natuurlijke oorsprong zonder bijzondere geur/kleur/zoutgehalte

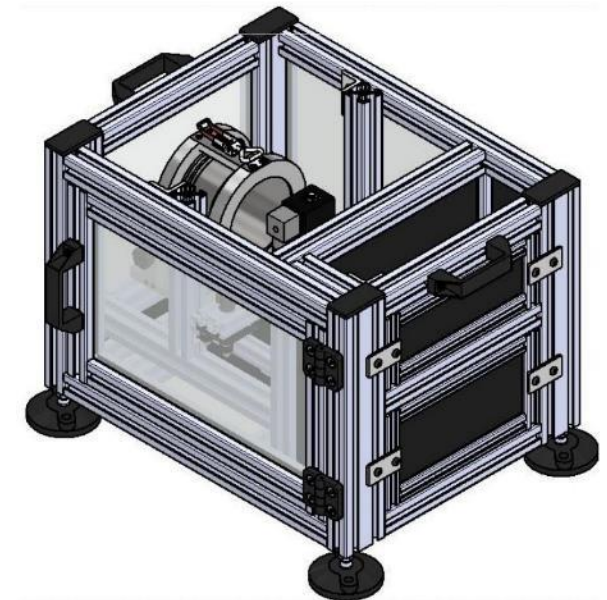
Het gaat om gemiddelde waarde van aantal monsters

Methodiek voor bepaling erodeerbaarheid Bestaande dijk

Stap 1: Elke 50 à 100 m een boring ($\varnothing$ 10 cm) op 20 cm tot ... diepte

- PET-proeven in nat seizoen en droge dichtheid op ongeroerde boormonsters
- Bereken eerste schatting erodeerbaarheid per locatie, met:
 - Schatting consistentie-index in natte winterseizoen
 - Zandgehalte
 - Standaardafwijking PET-proeven

Gestandaardiseerde PET:



Methodiek voor bepaling erodeerbaarheid Bestaande dijk

Stap 2: Profielkuil op locatie met grootste erodeerbaarheid (elke km)

- Steile Wand Test en PET-proeven in profielkuil in nat seizoen
- Soortelijke massa korrels met Pycnometerproef
- Bereken erodeerbaarheid op deze locatie:
 - Consistentie-index in natte winterseizoen
 - Standaardafwijking PET-proeven
 - Resultaat Steile Wand Test
 - Porositeit van de klei
- Corrigeer gemiddelde uit stap 1 als erodeerbaarheid uit stap 2 hoger is



Methodiek voor bepaling erodeerbaarheid Dijkversterking

Vorbereiden van monstername:

1

- Verdichten bij consistentie-index tussen 0,7 en 1,0

Stap 1: Elke 1000 à 5000 m³ een boring

- Verder hetzelfde als bestaande dijk
- Gebruik droge dichtheid uit verdichtingseis voor het uit te voeren werk

Stap 2: Profielkuil op locatie met grootste erodeerbaarheid

- Alleen zinvol als klei al enkele jaren in voldoende verdichte staat aanwezig is
- Verder hetzelfde als bestaande dijk, droge dichtheid uit verdichtingseis voor aannemer

Methodiek voor bepaling erodeerbaarheid Dijkversterking



Vorbereiden van monstername:

- Verdichten bij consistentie-index tussen 0,7 en 1,0

Stap 1: Elke 1000 à 5000 m³ een boring

- Verder hetzelfde als bestaande dijk
- Gebruik droge dichtheid uit verdichtingseis voor het uit te voeren werk

Stap 2: Profielkuil op locatie met grootste erodeerbaarheid

- Alleen zinvol als klei al enkele jaren in voldoende verdichte staat aanwezig is
- Verder hetzelfde als bestaande dijk, droge dichtheid uit verdichtingseis voor aannemer

Vervolg in 2025

- Discussie met betrokkenen (o.a. over uitvoerbaarheid)
- Probabilistische rekenmethode voor faalkans van klei(laag)
- Verificatie met Deltagootproeven:
 - Zeeuwse klei
 - Rivierklei
- Wellicht ook methode voor keileem



Overige aspecten t.a.v. klei op dijken

Methode is slechts voor **erodeerbaarheid**.

Let ook op:

- Verwerkbaarheid
- Begroeibaarheid
- Waterdoorlatendheid
- Minimale kleilaagdikte ivm graverij
-



Info uit proeven ook bruikbaar voor andere mechanismen (zoals STBI)

Vragen/discussie

