


STERKE LEKDIJK

MEMO

Datum : 5-9-2023
Aan : Technisch Team HDSR
Van : Stef Engels
Betreft : Aanbevelingen vervolgonderzoek en toepassingen STBI-1 en STBI-2 binnen Sterke Lekdijk
Review : Jan-Willem Bardoel Paraaf 
Bijlagen :

1. Inleiding

In de eerste twee kwartalen van 2023 is voor deeltraject SAS het proces voor de mogelijke toepassing van een aantal innovatieve rekenmethodieken doorlopen. Dit proces is beschreven in [Ref. 1]. De onderzochte rekeninnovaties voor deeltraject SAS en de conclusies per rekeninnovatie zijn gerapporteerd in het Logboek Rekenmethodieken [Ref. 1]. Voor STBI-1 (Sterkteparameters afleiden bij lager rekpercentage) en STBI-2 (Sterkte van siltige en zware klei modelleren via Su tabel) is de ontwikkeling binnen deeltraject SAS afgerond en is overgegaan op implementatie in het reguliere ontwerpsoor. Deze memo beschrijft aanbevelingen voor vervolgonderzoek en toepassingen van STBI-1 en STBI-2 binnen de andere deeltrajecten Sterke Lekdijk.

2. Resultaat STBI-1 en STBI-2 voor deeltraject SAS

Allereerst is kort ingegaan op de resultaten van het innovatietraject rekenmethodieken voor deeltraject SAS. De volledige uitwerking van de analyse is gerapporteerd in [Ref. 2]. Binnen SAS zijn twee typen klei te onderscheiden. Dit betreffen:

- Klei Zwaar ($\gamma > 17,5 \text{ kN/m}^3$);
- Klei Licht ($\gamma < 17,5 \text{ kN/m}^3$).

Over het algemeen geldt dat de grondsoort 'Klei Zwaar' bij deeltraject SAS voorkomt boven de GLG van NAP -2,0 m. 'Klei Licht' is over het algemeen onder dit niveau aangetroffen. Het sterktegedrag van het dijksmateriaal ($\gamma > 17,5 \text{ N/m}^3$) past binnen de verzameling van de grondsoort Klei Zwaar.

Om de toepasbaarheid van STBI-1 en STBI-2 aan te tonen zijn extra laboratoriumproeven uitgevoerd. Deze proeven bestonden uit:

- NC triaxiaal compressie proeven;
- OC triaxiaal compressie proeven;
- OC DSS proeven;
- OC triaxiaal extensie proeven.

Op basis van de analyse is geconcludeerd dat de sterkte van zowel 'Klei Licht' als 'Klei Zwaar' veilig kan worden afgeleid bij een rekpercentage van 15% axiale rek omdat alle proeven dan duidelijk over de pieksterkte heen zijn. Echter is ook geconcludeerd dat de schuifsterkte afgeleid in de triaxiaal compressie proeven niet representatief is voor het sterkte voor het gehele schuifvlak. De sterkte op basis van enkel triaxiaal compressie proeven overschat de sterkte in de neutrale en passieve zone van het glijvlak. Deze ongedraineerde sterkte anisotropie is zowel bij de grondsoort Klei Licht als Klei Zwaar geconstateerd.

Op basis van de analyse is tevens geconcludeerd dat de sterkte van de grondsoort Klei Zwaar veilig gemodelleerd kan worden met een Su tabel bij 15% axiale rek. Echter dient een gereduceerde sterkte te worden toegepast in de neutrale en passieve zone van het glijvlak als het gevolg van ongedraineerde sterkte anisotropie. De sterkte anisotropie bij de grondsoort Klei Zwaar is groter dan bij de grondsoort Klei Licht. Binnen SAS is er voor gekozen om de Su tabel voor het gehele dijklichaam toe te passen met uitzondering van de gestructureerde toplaag van 1,0 m dikte. Het eventueel voorkomen van een gemiste zandscheg (waar gedraineerd gedrag een correcte modellering is) wordt ondervangen in een scenario bij het afleiden van de schematiseringsfactor.

3 Aanbevelingen voor toepassing STBI-1 en STBI-2 binnen Sterke Lekdijk

In de onderstaande paragrafen zijn de aanbevelingen voor de toepassing van STBI-1 en STBI-2 voor overige deeltrajecten van de Sterke Lekdijk uiteengezet op basis van de ervaringen die zijn opgedaan binnen deeltraject SAS.

3.1 Kwaliteit laboratoriumproeven

Bij de analyse van de laboratoriumproeven van SAS is onderscheid gemaakt in kwalitatief goede, kwalitatief matige en kwalitatief slechte proeven. Hierbij zijn de kwalitatief slechte proeven uitgesloten van de statistiek. Wat opviel is dat een relatief groot aandeel proefresultaten als slecht zijn beoordeeld. Het gaat hierbij om de volgende percentages:

- Circa 40% van de triaxiaal compressie proeven;
- Circa 20% van de DSS proeven;
- Circa 30% van de triaxiaal extensie proeven.

De kwalitatief slechte triaxiaal compressie proeven komen in ongeveer gelijke mate voor bij de grondsoorten Klei Licht in Klei Zwaar. Voor SAS is grotendeels ingezet op OC triaxiaal proeven. Wat opvalt is dat de sterktemobilisatie anders verloopt door dilatant grondgedrag. Hierdoor zie je dat de pieksterkte bij OC triaxiaalproeven later wordt bereikt dan bij NC triaxiaal proeven.

Voor deeltraject SAS zijn de proeven beoordeeld op basis van:

- Vloeiend spannings-rek verloop;
- Verloop spanningspad richting theoretische critical state line;
- Mogelijke heterogeniteit van het monster;
- Mogelijke invloed van het membraam door grote vervormingen.

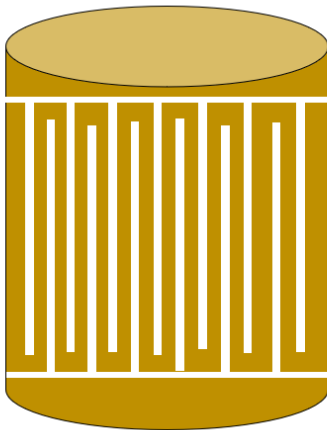
Om proeven onderling nog beter te vergelijken is de aanbeveling om alle spanningspaden van alle proeven in één figuur te plotten. Op deze manier kan er mogelijk in één oogopslag onderscheid gemaakt worden tussen verschillende grondsoorten en de kwaliteit van de proeven op basis van hoe de individuele proefresultaten op de theoretische Critical State Line plotten.

3.2 Advies type proeven

De resultaten van de OC triaxiaal extensie proeven zijn lastig eenduidig te interpreteren. Wat opvalt is een grote mate van softening. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de grote oppervlakte reductie bij het bezwijkvlak (necking effect) wat hoge geconcentreerde spanningen veroorzaakt binnen het monster. Binnen de analyse is geprobeerd te corrigeren voor deze oppervlakte-reductie maar de resultaten waren onbetrouwbaar door een blijvende toenemende sterkte en grote onzekerheid in de afname van het bezwijkoppervlak (niet gemeten tijdens de proef).

Er is nog weinig ervaring met het uitvoeren van triaxiaal extensie proeven. Binnen SAS is geëxperimenteert met monsters met een grotere diameter (diameter van 67 mm), met een lagere reksnelheid en verschillende doorknip locaties van de drainage strips van de drainage strips. Hieruit zijn de volgende ervaringen opgedaan:

- Voor de reksnelheid is de aanbevolen reksnelheid de helft van wat het protocol voorschrijft voor triaxiaal compressie proeven, afhankelijk van de t_{100} van de isotrope consolidatiesnelheid met een maximale snelheid van 0,5% per uur.
- Bij monsters met een grotere diameter (67 mm) lijkt het afschuifvlak zich beter te ontwikkelen.
- De drainage strips om en om aanbrengen zodat ze elkaar niet aanraken maar wel voldoende oppervlak is bedekt geeft het minste invloed op de gemeten treksterkte. Dit principe is weergegeven in figuur 1.



figuur 1: principe aanbrengen drainage strips bij TXE proeven

Vanwege het gebrek aan een eenduidige interpretatie zijn de triaxiaal extensie proeven enkel gebruikt om de trend in het sterkteverloop te ontdekken. Bij het ontwerpen van een versterking is het mogelijk dat NC gedrag (bijvoorbeeld door het aanbrengen van een steunberm) beter past bij de werkelijkheid dan OC gedrag. In deze situatie kan worden overwogen om NC triaxiaal extensie proeven uit te voeren. Indien wordt gekozen om deze proeven uit te voeren wordt aanbevolen om de uitgangspunten omtrent reksnelheid en locatie drainage strips aan de voorkant eenduidig af te stemmen met het geotechnisch laboratorium. Tevens is het advies om tijdens de proef de omtrek van de insnoering te meten. Op deze manier kan er gecorrigeerd worden voor oppervlaktereductie. Landelijk zal er meer kennis moeten worden opgedaan met het uitvoeren van triaxiaal extensie proeven om een eenduidige uitvoeringsmethodiek vast te stellen. Het voornaamste aandachtspunt is hierbij consensus over hoe de correcties moeten worden toegepast.

De resultaten van de OC DSS proeven laten een beduidend lagere sterkte zien dan de OC triaxiaal compressie proeven. Binnen de DSS proef wordt de hoogte constant gehouden waardoor dilatant gedrag van een monster wordt onderdrukt. Er wordt geadviseerd de mate van sterkte anisotropie tussen triaxiaal compressie en DSS te controleren bij NC condities waar monsters contractant gedrag vertonen. De verwachting is dat deze werkwijze alleen kan worden uitgevoerd bij de lichtere kleien die contractant gedrag vertonen bij NC condities.

Voor een meer zuivere vergelijking tussen de triaxiaal compressie zone en de neutrale zone is het ook mogelijk om een DSS proef uitgevoerd onder constante bovenbelasting in plaats van constante hoogte. Dit komt beter overeen met de in-situ belastingssituatie.

Voor zware grondsoorten die 'transitional soil' gedrag vertonen is het advies om geen NC triaxiaal proeven uit te voeren op ongeroerde grondmonsters, maar om een Su tabel af te leiden op basis van OC triaxiaal proeven over het gehele spanningsbereik waar deze grondsoort voorkomt. Omdat er geen directe relatie tussen OCR en sterkte bestaat voor deze grondsoorten zijn de sterkteproeven ongeschikt om een waarde van parameter m af te leiden. Voor SAS is hier uitgegaan van een conservatieve waarde van $m=0,7$ op basis van literatuur.

3.3 Toepassingsgebied Su-tabel

Binnen het deeltraject SAS is de Su-tabel voor dijksmateriaal toegepast onder een gestructureerde toplaag van 1,0 m dikte. De achterliggende gedachte hierbij is de verzadigingsgraad van dit gedeelte van de dijk hoog genoeg is om ongedraineerd gedrag te veronderstellen tijdens een hoogwater.

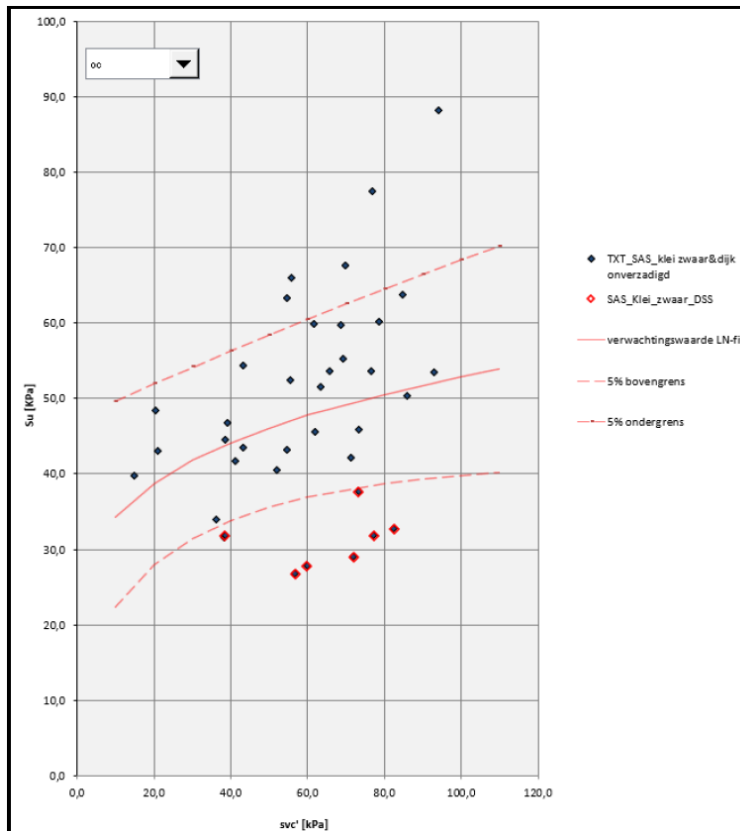
De Su-tabel is enkel toepasbaar voor de grondsoort klei. Indien lokaal een stoorlaag of zandscheg voorkomt die gedraineerd reageert is de Su-tabel geen correcte modelleringswijze. Het advies is om dit risico te ondervangen in een van de scenario's in de afleiding van de schematiseringsfactor.

Bij het toepassen van een Su tabel is de aanbeveling om te onderzoeken hoe gevoelig een doorsnede is voor het incidenteel voorkomen van een gemiste zandscheg. Voor deze controle kan in de eerste instantie een conservatief scenario in de schematiseringsfactor worden gekozen. Indien de gevoeligheid hoog is wordt geadviseerd om een relatief hoge onderzoekdichtheid te hanteren zodat het risico op voorkomen van onvoorziene gedraineerde lagen te minimaliseren. Voor de onderzoekdichtheid wordt een hart-op-hart afstand van 25,0 m aanbevolen.

3.4 Omgang met ongedraineerd sterkte anisotropie

Er is een ongedraineerde sterkte anisotropie geconstateerd bij zowel 15% axiale rek en 25% axiale rek bij zowel Klei Licht als Klei Zwaar. Wanneer er bij de sterkte afleiding enkel gebruik wordt gemaakt van triaxiaal compressie proeven is de aanbeveling voor de Sterke Lekdijk om dit te doen bij 25% axiale rek. Landelijk is het advies om meer onderzoek te doen naar mogelijke ongedraineerde sterkte anisotropie (ook binnen SAFE en GOWA is sterkte anisotropie geconstateerd).

Om mogelijke ongedraineerde sterkte anisotropie inzichtelijk te maken wordt geadviseerd om de resultaten van de triaxiaal compressie proeven en de DSS proeven in één figuur te plotten en te beoordelen of de proeven binnen één verzameling passen. Bij het afleiden van een Su-tabel die tevens input is voor de D-Stability berekening is de aanbeveling om de DSS proeven niet te corrigeren als gevolg van plane strain condities. De reden hiervoor is dat dit verschil in een glijvlak analyse is ondervangen in de modelfactor. Een voorbeeld van een vergelijkingsplot is toegevoegd in figuur 2.



figuur 2: Triaxiaal compressie en DSS resultaten voor Klei Zwaar bij 15% axiale rek

Op basis van DSS proeven in combinatie met zonering (onderscheid tussen ongedraineerde sterkte in actieve, neutrale en passieve zone van het glijvlak) kan de sterkte mogelijk worden geoptimaliseerd. DSS proeven zijn tevens aan te bevelen om te beoordelen of de sterkte kan worden afgeleid bij een lager rekpercentage. Er wordt aanbevolen circa 10 DSS proeven per grondsoort uit te voeren (zoals ook de insteek was voor SAS [Ref. 2]). Bij de afleiding van een S_u -tabel is het advies om geen correctie toe te passen op de plane strain condities.

3.5 Correcties voor membraam en drainage strips

Bij de triaxiaal compressie proeven is veelal een blijvende afnemende deviatorspanning geconstateerd tot de eindrek. Het vermoeden was dat dit kwam door de toegepaste correcties voor het membraam en de drainage strips bij het uitwerken van de proef. Op basis van deze hypothese zijn enkele proeven door Inpijn-Blokpoel zonder deze correcties uitgewerkt. Echter was voor SAS de conclusie dat de afnemende trend in deviatorspanning niet te wijten was aan de toegepaste correcties. Waarschijnlijk is de blijvende afnemende trend een gevolg van de zeer robuuste structuur bij zware klei waardoor de theoretische critical state pas bij zeer hoge rekken optreedt. Bij vergelijkbare grondsoorten qua samenstelling en volumegewicht wordt geadviseerd om geen energie te steken in het uitwerken van proeven zonder correcties voor membraam en drainage strips.

Referenties

- [Ref. 1] Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Logboek Rekenmethodieken, versie 2.1, 30-06-2023
- [Ref. 2] Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Innovatieve bepaling sterkteparameters SAS, versie 1.0, 30-06-2023

