

LANDELIJKE GRONDPARAMETERSET
AFLEIDEN VAN KENTALLEN
VOOR GRONDSTERKTE

RAPPORT

2023

37

ISBN 978.94.6479.020.7



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Paulina Kindermann
Jan Tigchelaar

VORMGEVING Buro Vormvast

STOWA STOWA 2023-37

ISBN 978.94.6479.020.7

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

GEOTECHNISCHE DATABASE BESPAART KOSTEN EN TIJD

STOWA heeft de resultaten van tien jaar onderzoek naar de sterkte eigenschappen van grondsoorten in Nederland bijeen gebracht in een geotechnische database. Deze database bespaart kosten door bestaande kennis en ervaringen te ontsluiten voor toepassing elders. STOWA ondersteunt en begeleidt dit onderzoek via het Ontwikkelprogramma Regionale Keringen.

Het onderzoek heeft sinds 2013 een schat aan informatie opgeleverd over de eigenschappen van de diverse grondsoorten in Nederland. Deze geotechnische eigenschappen helpen waterschappen en andere regionale waterbeheerders bij het bepalen en realiseren van maatregelen voor beheer en versterking van waterkeringen. De gegevens zijn opgeslagen in een database, die toegankelijk is voor waterbeheerders. Maar hoe kun je al die geotechnische eigenschappen praktisch toepassen?

Om waterbeheerders verder te faciliteren bij hun werk, liet het ontwikkelprogramma ORK de geotechnische meetgegevens analyseren. Dit rapport bevat de highlights uit die analyse en helpt regionale waterbeheerders aan specifieke, technische informatie over de grondeigenschappen van gebieden die vergelijkbaar zijn met locaties binnen hun eigen beheergebied. Bij elkaar genomen, levert alle informatie een actueel en nauwkeurig beeld op van de geotechnische gesteldheid van Nederland.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

LANDELIJKE GRONDPARAMETERSET AFLEIDEN VAN KENTALLEN VOOR GRONDSTERKTE

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	DE STOWA IN HET KORT	
	INHOUD	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Uitgangspunten en werkwijze	1
1.3.1	De data	1
1.3.2	Sterkteparameters	3
1.3.3	Statistiek	5
1.3.4	Ruimtelijke beeld	7
1.3.5	Werkwijze data analyse	7
1.4	Leeswijzer	8
2	ANALYSES VOLUMIEKE GEWICHT	9
2.1	Klei	9
2.1.1	Siltige klei	12
2.1.2	Zandige klei	13
2.1.3	Humeuze klei	14
2.2	Veen	16
2.2.1	Kleilig veen	16
2.3	Samenvatting	17

3	ANALYSES STERKTE	18
3.1	Klei	18
3.1.1	Consolidatiegraad	18
3.1.2	Consolidatiewijze	20
3.1.3	Ongedraineerde schuifsterkte ratio S	22
3.1.4	Effectieve hoek van inwendige wrijving (CSSM)	25
3.1.5	Effectieve hoek van inwendige wrijving en cohesie (Mohr-Coulomb)	26
3.2	Veen	28
3.2.1	Ongedraineerde schuifsterkte ratio S (CSSM)	29
3.2.2	Effectieve hoek van inwendige wrijving (CSSM)	30
3.2.3	Effectieve hoek van inwendige wrijving en cohesie (Mohr-Coulomb)	30
4	LANDELIJKE SPREIDING	33
4.1	er moet hier nog een paragraafkopje komen	33
4.1	Klei	33
4.1	Veen	36
5	CONCLUSIES & AANBEVELINGEN	38
5.1	Conclusies	38
5.2	Aanbevelingen	44
6	REFERENTIES	48
BIJLAGE A	STERKTEPARAMETERS	49
BIJLAGE B	ANALYSES LANDELIJKE SPREIDING	58
BIJLAGE C	STATISTISCHE FORMULES C EN Φ	61

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

In opdracht van de STOWA is een analyse uitgevoerd op enkele grondparameters uit de landelijke database met grondparameters zoals die is samengesteld met de resultaten van laboratoriumproeven van diverse waterschappen. De analyse is gericht op de geotechnische gegevens die gebruikt kunnen worden bij het maken van stabiliteitsberekeningen voor regionale keringen. De analyse betreft een verkenning, het resultaat dient bij de besluitvorming om eventueel, op termijn, de gegevens van laboratoriumproeven zoals die nu worden verzameld in de BRO te gaan gebruiken. HKV heeft een verzameling ondergrondgegevens en analyses die hiervoor gebruikt kan worden. Deze verzameling is gebaseerd op een bundeling van datasets van waterschappen, verrijkt met aanvullende informatie wat betreft de grondsoortbeschrijving.

1.2 DOELSTELLING

Het doel van het project is een verkenning naar de waarde van enkele geotechnische eigenschappen op basis van reeds beschikbare ondergrondinformatie. De te beschouwen parameters richten zich op het volumegewicht en de sterkte van grond, zoals weergegeven in Tabel 1.1. Voor deze parameters zullen – middels een steekproef uit de dataset - een verwachtingswaarde, standaardafwijking en indien van toepassing een karakteristieke waarde afgeleid worden.

TABEL 1.1 OVERZICHT AF TE LEIDEN GRONDPARAMETERS

Parameter	Symbool	Eenheid
Nat volumieke gewicht	γ_n	[kN/m ³]
Droog volumieke gewicht	γ_d	[kN/m ³]
Ongedraineerde schuifsterkte ratio (CSSM)	S	[-]
Effectieve hoek van inwendige wrijving (CSSM)	φ_{cs}'	[°]
Cohesie (Mohr-Coulomb)	c'	[kN/m ²]
Effectieve hoek van inwendige wrijving (Mohr-Coulomb)	φ'	[°]

1.3 UITGANGSPUNTEN EN WERKWIJZE

1.3.1 DE DATA

Bij de uitwerking is gebruik gemaakt van een database bestaande uit beschikbare proevenverzamelingen in STOWA versie 4.2 formaat (excel). Dit betreft informatie van meerdere waterschappen, waaronder de Hoogheemraadschappen Delfland, Rijnland, de Stichtse Rijnlanden, Hollands Noorderkwartier, Schieland & de Krimpenerwaard, de waterschappen Rivierenland, Drents-Overijsselse Delta, Rijn & IJssel en het Wètterskip Fryslan. De data bestaat uit proeven bij zowel regionale als primaire keringen.

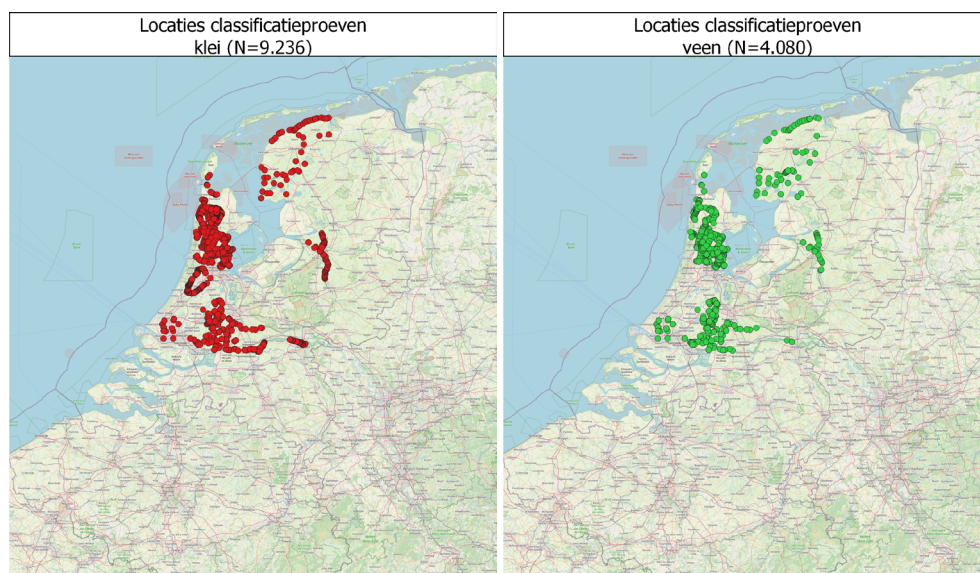
In totaal bestaat de database uit 30.079 proeven. Niet alle proeven zijn relevant voor de uit te voeren analyses. De data die is gebruikt bestaat uit:

- 9.236 bruikbare classificatieproeven op klei;
- 4.080 bruikbare classificatieproeven op veen;
- 3.851 bruikbare triaxiaalproeven (TRX) op klei;
- 1.390 bruikbare Direct Simple Shear (DSS) proeven op veen.

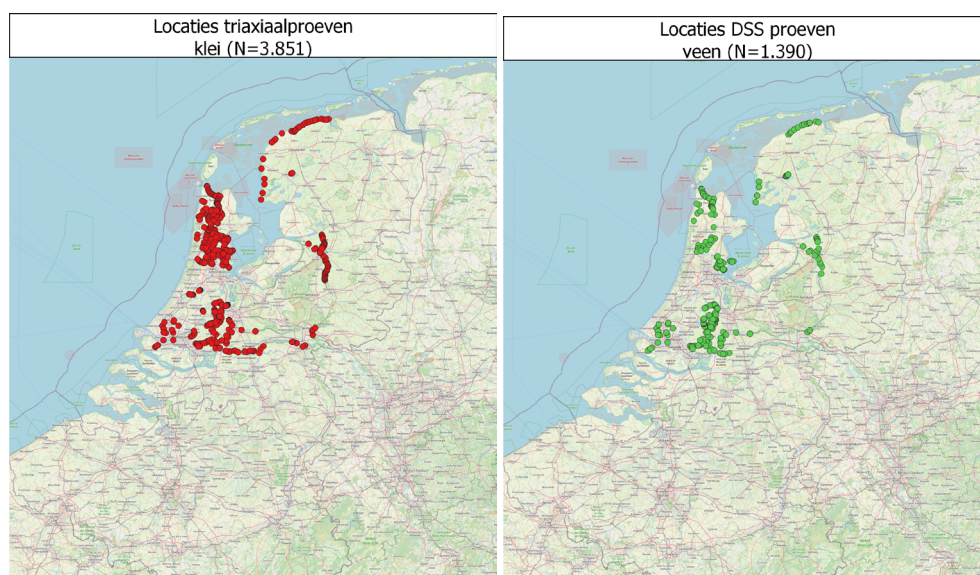
Er is van uitgegaan dat de beschikbare data correct is. Op de data is geen kwaliteitsslag uitgevoerd en kan dus uitbijters of onjuiste data bevatten. Vanwege de omvang zal dit niet van invloed zijn op de schatting van het gemiddelde. Voor enkele schattingen zal de selectie wel worden beperkt om de invloed van fysisch onlogische uitkomsten zo veel mogelijk te beperken. Dit is verder toegelicht in paragraaf 1.3.5 en in de betreffende paragrafen van de verschillende parameters.

In Figuur 1.1 en Figuur 1.2 zijn de (boor-)locaties van deze proeven weergegeven. Daarnaast zijn resultaten van verschillende andere proeven beschikbaar, zoals samendrukkingsproeven en sonderingen, maar deze zijn niet gebruikt voor de analyses van deze studie.

FIGUUR 11 LOCATIES VAN BRUIKBARE CLASSIFICATIEPROEVEN



FIGUUR 12 LOCATIES VAN BRUIKBARE TRIAXIAALPROEVEN VOOR KLEI EN DSS PROEVEN VOOR VEEN



Uit Figuur 1.2 volgt dat de data over Nederland is verdeeld, maar dat weinig data beschikbaar is uit het oosten en zuiden van het land. Deze data is niet aangeleverd binnen dit project, dit is voor het beoogde doel minder van belang omdat de focus ligt op klei- en veenlagen (en die worden in het zuiden en oosten nu eenmaal minder vaak aangetroffen).

1.3.2 STERKTEPARAMETERS

Bij de toetsing van regionale keringen wordt gebruik gemaakt van de methode ‘gedraineerd rekenen’. Hiervoor hanteert men effectieve sterkteparameters (σ - τ curves of c - ϕ) uitgaande van het (Mohr-)Coulomb model. Hierbij was het in het verleden gangbaar om de sterkte te bepalen met isotroop geconsolideerde ongedraineerde triaxiaalproeven (compressie) bij kleine rekniveaus (2-5%). Daarbij werd ook vaak gekozen voor multistage (meerdere consolidatiespanningen en afschuiffasen op één proefstuk).

Voor primaire waterkeringen wordt de sterkte sinds 2017 anders bepaald. Voor klei worden tegenwoordig anisotroop geconsolideerde monsters ongedraineerd afgeschoven in de triaxiaalproef (compressie) en wordt de sterkte bij grote rekken bepaald. Hierbij wordt de proef alleen in single stage uitgevoerd; ofwel één consolidatie en afschuiffase voor één proefstuk. Voor veen worden DSS proeven uitgevoerd bij grote rekken. Hiervoor is een protocol beschikbaar [Deltares, 2011].

De beschikbare data bevat voornamelijk data die volgens het laatste protocol is ingewonnen. Desondanks is ook een serie isotroop geconsolideerde triaxiaalproeven (single stage) beschikbaar voor klei. In deze analyse zullen voor verschillende rekniveaus de isotrope en anisotrope proeven met elkaar worden vergeleken.

ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO (SHANSEP)

De ongedraineerde schuifsterkteratio (S [-]) is de ongedraineerde schuifsterkte gedeeld door de consolidatiespanning bij een overconsolidatiegraad (OCR) van 1. Het is een wrijvingsparameter voor het karakteriseren van de ongedraineerde schuifsterkte van grond onder normaal geconsolideerde condities. Bij het bepalen van S kan gebruik worden gemaakt van de piekwaarde van de schuifsterkte of van de waarde van de schuifsterkte bij grote rek (critical state; voor klei en zand 25% axiale rek bij triaxiaalproeven en voor veen 40% schuifrek bij direct simple shear proeven) [Rijkswaterstaat, 2021].

Voor normaal geconsolideerde monsters geeft de grote-rekwaarde van de halve deviatorspanning t ($= s_u$) uit deze proeven gedeeld door de gekozen consolidatiespanning σ'_{vc} de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio S :

$$S = \frac{s_u}{\sigma'_{vc}} = \frac{t}{s'_c + t_c} \quad (1)$$

In de STOWA database zijn de velden genaamd TXT_SS_T_{r}, TXT_SS_S'_EIND_CONSOLIDATIE en TXT_S_T_EIND_CONSOLIDATIE gebruikt voor t, s'_c, t_c respectievelijk voor klei, waarbij $\{r\}$ staat voor het rekniveau r . Voor veen is gebruikt gemaakt van de velden genaamd DSS_T_{r} voor τ en DSS_MAX_EFF_VERT_SPANNING_CONSOLIDATIE voor $\tau_{cons.} + \sigma_{cons.}$.

Het SHANSEP model maakt naast de parameter S gebruik van de sterktetoe name-exponent m en de pre-overburden pressure POP . Deze parameters zijn niet afgeleid binnen dit project; de parameter m en POP zijn niet beschikbaar in de database.

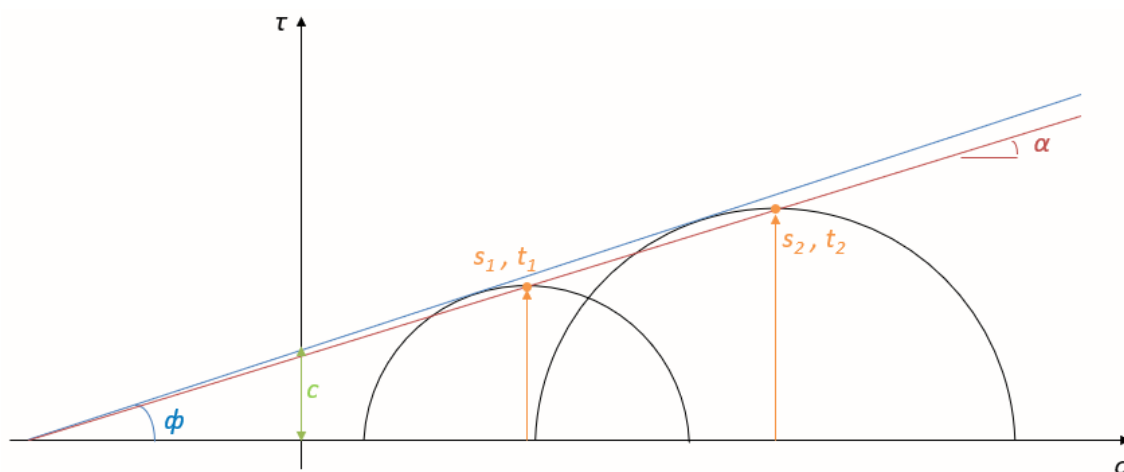
MOHR-COULOMB MODEL

Voor het uitvoeren van gedraineerde stabiliteitsanalyses wordt gebruik gemaakt van effectieve schuifsterkte parameters. De schuifsterkte langs het glijvlak wordt bepaald met de effectieve normaalspanning op het glijvlak. In de praktijk wordt vaak de aanname gedaan dat deze effectieve normaalspanning niet verandert tijdens het bezwijken en dat de dilatantiehoek ψ (de plastische volumetoename van een materiaal bij schuifvervorming) gelijk is aan de hoek van inwendige wrijving φ' . Dit impliceert een associatief Mohr-Coulomb model [Rijkswaterstaat, 2021] of [Teunissen, 2016]:

$$\tau = c' + \tan \varphi' \sigma \quad (2)$$

In visuele zin is de hoek van inwendige wrijving de lijn langs de raakpunten van de Mohr-cirkels in een $\sigma' - \tau$ - grafiek, zoals weergegeven in Figuur 1.3.

FIGUUR 1.3 WEERGAVE VAN TRIAXIAALPROEF RESULTATEN IN HET MOHR-COULOMB MODEL ($c=0$ IN DE CRITICAL STATE)



Echter sluit de aanname dat $\psi < \varphi'$ beter aan bij het werkelijke grondgedrag, waarbij het niet-associatieve Mohr-Coulomb model hoort [Rijkswaterstaat, 2021] of [Teunissen, 2016]:

$$\tau = \frac{(c' \cos \varphi' + \sigma \cdot \sin \varphi') \cdot \cos \Psi}{1 - \sin \Psi \cos \varphi'} \quad (3)$$

EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING EN COHESIE (MOHR-COULOMB)

Bij de toetsing van regionale keringen wordt voornamelijk het Mohr-Coulomb model bij kleine rekniveaus (2-5%) gebruikt. Bij kleine rekniveaus is in deze analyse gebruik gemaakt van het spreadsheet vanuit Deltares. Hierin is uitgegaan van de formules zoals in de Schematiserings-handleiding macrostabiliteit [Rijkswaterstaat, 2021], waarbij de relatie tussen α en φ overeenkomt met formule (4). Met behulp van deze methode berekent het spreadsheet de cohesie c' [kPa] en de hoek van inwendige wrijving φ' [°], op basis van een serie proefresultaten uit triaxiaalproeven of direct simple shear proeven. De invoerwaarden uit triaxiaalproeven zijn s' en t in kPa en uit DSS proeven σ_v en τ in kPa. Meer informatie is te vinden in de memo behorende bij het spreadsheet [Calle en Van Duinen, 2015].

EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (CSSM)

Bij macrostabiliteit zijn grote vervormingen nodig om de schuifsterkte van de grond langs het gehele schuifvlak volledig te mobiliseren. Bij de grote rekken (in critical state) wordt aangenomen dat de spannings- en volumeveranderingen bij doorgaande schuifvervorming

naar 0 reduceren en dat de cohesie c dan gelijk is aan 0 kPa. De schuifsterkte kan dan worden beschreven met de critical state hoek van inwendige wrijving. In dat geval gaat de blauwe lijn (φ) in Figuur 1.3 door de oorsprong. Bij de critical state treedt bovendien per definitie geen plastische volumevervorming meer op, zodat $\psi = 0^\circ$. Uitgaande van de vorming van een doorgaand schuifvlak met de critical state schuifsterkte volgt dan:

$$\frac{\tau}{\sigma'} = \tan \alpha = \sin \varphi' \quad (4)$$

In de STOWA database zijn de velden genaamd TXT_SS_T_{r} en TXT_SS_S'_{r} gebruikt voor τ, σ respectievelijk voor klei, waarbij {r} staat voor het rekniveau r . Voor veen is gebruik gemaakt van DSS_T_{r} en DSS_S_{r}. In de analyse is bij grote rekken dus uitgegaan van $\psi=0$.

1.3.3 STATISTIEK

Schattingsformules voor de sterkte worden gebaseerd op gangbare richtlijnen (WBI). De werkwijze is onderstaand voor de verschillende parameters nader toegelicht.

VOLUMIEKE GEWICHT

Voor het volumieke gewicht wordt in de praktijk geen karakteristieke waarde toegepast en wordt alleen gebruik gemaakt van de verwachtingswaarde (gemiddelde). Bij de resultaten is de standaardafwijking van de steekproef weergegeven om een indruk te geven van de spreiding.

ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S EN EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (CSSM)

Op basis van de proeven is een verwachtingswaarde en een standaardafwijking afgeleid, volgens de werkwijzen zoals omschreven in paragraaf 1.3.2. Daarnaast is voor semi-probabilistische beoordelingen een karakteristieke waarde vereist. In het geval van φ_{cs}' en S is dit de 5% ondergrens op basis van een lognormale verdeling. Voor een lognormale verdeling wordt de karakteristieke waarde van de mediaan, rekening houdend met uitmidding van onzekerheid langs het schuifvlak, bepaald met [Rijkswaterstaat, 2021]:

$$X_{med, kar} = \exp \left[\mu_{\ln(X)} \pm t_{n-1}^{95\%} \cdot \sigma_{\ln(X)} \cdot \sqrt{(1-\alpha) + \frac{1}{n}} \right] \quad (5)$$

waarin:

$$\mu_{\ln(X)} = \frac{\sum \ln(X)_i}{n} \quad (6)$$

$$\sigma_{\ln(X)} = \sqrt{\frac{\sum (\ln(X)_i - \mu_{\ln(X)})^2}{n-1}} \quad (7)$$

waarin:

X waarneming in een steekproef.

$X_{med, kar}$ Karakteristieke waarde van de mediaan van een steekproef voor een lognormale verdeling.

$\mu_{\ln(X)}$ Gemiddelde waarde van de logaritme van een steekproef.

$t_{n-1}^{95\%}$ Student t-factor, die hoort bij de 5% karakteristieke ondergrenswaarde en het aantal 'vrijheidsgraden' (n-1) [-].

$\sigma_{\ln(X)}$ Standaardafwijking van de logaritme van de steekproef.

α Verhouding tussen de lokale en regionale variantie spreidingsreductiefactor

n Aantal waarnemingen [-].

Hierbij is rekening gehouden met het feit dat het gaat om een niet-perfecte lognormale verdeling met een beperkt aantal waarnemingen.

De spreidingsreductiefactor ($\Gamma^2 = 1 - \alpha$) beschrijft de invloed van de ruimtelijke variatie (conform de huidige leidraden) en is nodig om een schatting van een (laaggemiddelde) grondparameter in een specifieke grondlaag te maken.

Voor de spreidingsreductiefactor zijn in de praktijk twee waarden gangbaar: $\alpha = 0,75$ voor een regionale proevenverzameling en $\alpha = 1,0$ voor een lokale proevenverzameling. Een lage α (0,75) zorgt voor een hoge spreidingsreductiefactor, waardoor de karakteristieke waarde lager is dan bij $\alpha = 1,0$. Met andere woorden, een lage α zorgt voor een 'ongunstigere' karakteristieke waarde, omdat rekening gehouden wordt met tegenvallers in ruimtelijke zin.

In algemene zin is het verwerken van een ruimtelijke invloed van parameters binnen grondlagen discutabel voor kentallen voor Nederland. De grondlagen strekken zich niet zo ver uit en feitelijk volgen uit de analyse relaties tussen de grondsoort en de eigenschappen. Het is te verdedigen om gebruik te maken van klassieke schattingsformules waarbij de 5% ondergrens wordt bepaald. Dit correspondeert met $\alpha=1$ in bovenstaande formule.

Voor een specifieke situatie zal de ruimtelijke invloed wèl van belang zijn. In dat geval zal α kleiner worden en moet een waarde kleiner dan 1 worden gekozen. Voor een optimaal resultaat kan hierbij een regionaal deel van de data worden gebruikt in combinatie met $\alpha = 0,75$, zoals nu ook gebruikelijk is. Hiermee wordt dan recht gedaan aan regionale gemiddelden en spreiding.

In dit project zijn resultaten gepresenteerd voor beide α 's.

EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING EN COHESIE (MOHR-COULOMB)

De statistische eigenschappen van de cohesie c' en de effectieve hoek van inwendige wrijving φ' zijn complexer, omdat er sprake is van een correlatie tussen deze parameters. Voor het afleiden van de kentallen voor c en φ op basis van proevenverzamelingen is daarom gebruik gemaakt van een excel sheet vanuit Deltares. De formules uit de sheet zijn toegepast om de statistiek van beide parameters af te leiden.

Het spreadsheet maakt gebruik van een lineaire regressieanalyse op basis van de kleinste kwadratenmethode [Calle en Van Duinen, 2015]. Met behulp van deze methode berekent het spreadsheet verwachtingswaarden, karakteristieke waarden en rekenwaarden van de cohesie c' [kPa] en de hoek van inwendige wrijving φ' [°], op basis van een serie proefresultaten uit triaxiaalproeven of direct simple shear proeven. De invoerwaarden uit triaxiaalproeven zijn s' en t in kPa en uit DSS proeven σ_v en τ in kPa. Meer informatie is te vinden in de memo behorende bij de spreadsheet [Calle en Van Duinen, 2015]. In deze memo is een voorstel gedaan voor een nieuwe te hanteren formule voor het berekenen van de 5% onder- en bovengrenzen. Binnen dit project zijn de betreffende formules in de bestaande spreadsheet daarom aangepast en zijn de voorgestelde formules gebruikt. Dit is beknopt toegelicht in Bijlage C en uitgebreider in [Calle en Van Duinen, 2015]. Voor DSS proeven (veen) is gebruik gemaakt van een aangepaste sheet door [Waterschap Rivierenland, 2022] die ook gebruikt maakt van de voorgestelde formules voor de onder- en bovengrenzen.

Met behulp van deze relaties zijn de 5% boven- en ondergrenslijnen en de fysisch realiseerbare ondergrenslijn op basis van de (s,t) -data uit de relevante proeven afgeleid. De daaruit volgende karakteristieke waarden kunnen verschillen per spanningsniveau (door de niet lineaire relatie van de karakteristieke ondergrens). Binnen dit project zijn de karakteristieke waarden afgeleid bij een spanningsniveau tussen ca. 30 en 40 kPa. Hiervoor is met betrekking tot de spreidingsreductiefactor wederom uitgegaan van zowel een lokale ($\alpha = 1,0$) als een regionale ($\alpha = 0,75$) proevenverzameling. Het kan voorkomen dat de met de kleinste kwadratenmethode berekende ondergrens tot negatieve waarden van de karakteristieke waarde van de cohesie c' leidt. Dit is fysiek onrealistisch. In dat geval is de karakteristieke waarde van de cohesie handmatig op nul kPa gesteld en is de karakteristieke waarde van φ zodanig aangepast dat de fysisch realiseerbare ondergrens de 5% ondergrenslijn raakt. Dit kan in de praktijk leiden tot een φ die lager is dan het gemiddelde van de steekproef op het beschouwde spanningsbereik. Dit is een conservatieve benadering.

1.3.4 RUIMTELIJKE BEELD

In een eerder project [Tigchelaar, J. en Daggenvoorde, R. 2017] is een landelijk beeld gemaakt op basis van het volume gewicht van grond en van de sterkte S . In Nederland zijn zones bepaald die vergelijkbare kentallen van de grondsterkte tonen, deze zones waren het uitgangspunt van de analyse. De analyse is destijds uitgevoerd door groepen te maken op basis van volumegewicht. Op basis van deze groepen is een statistische toets uitgevoerd.

In de beschikbare Stowa database was de grondbeschrijving niet consistent met NEN5104 uitgewerkt (beschreven). Dit is handmatig per record aangepast. Met de uitgebreide dataset, inclusief NEN5104 grondsificaties, is het mogelijk om deze analyse te herhalen met groepen op basis van grondsoort. Dit is binnen dit project uitgevoerd, waarbij onderscheid is gemaakt in de grondsoorten klei totaal, siltige klei, zandige klei, humeuze klei, veen totaal, kleilig veen en mineraal veen. De analyse is uitgevoerd om een beeld te vormen van de landelijke spreiding, voor het volumegewicht en voor de ongedraineerde schuifsterkte ratio.

1.3.5 WERKWIJZE DATA ANALYSE

De werkwijze voor de data analyse is als volgt:

1. Als eerste is het volumieke gewicht geanalyseerd per grondsoort. Deze analyse is gebaseerd op de (grove) grondsoort categorieën: siltig, zandig en humeus voor klei, mineraalarm en kleilig voor veen.
2. Vervolgens is een verfijning gemaakt op basis van grondsoort conform NEN5104. Bijvoorbeeld: klei, zwak siltig. Indien de verfijning zorgt voor andere kentallen, dan is deze verder aangehouden bij het afleiden van de parameters. Opgemerkt wordt dat NEN5104 niet meer vigerend is en vervangen is door NEN-EN-ISO-22476-1.
3. Outliers zijn geanalyseerd (door het o.a. het watergehalte te beschouwen) en verwijderd (kleiner dan 5% of groter dan de 95% percentielwaarde);
4. Met de overgebleven data zijn de kentallen voor het volumieke gewicht afgeleid per categorie;
5. Met dezelfde overgebleven data zijn de andere sterkteparameters afgeleid, waarbij de selectie verder is verfijnd op basis van consolidatiewijze, -graad en rekniveau.
6. Daarnaast is een analyse uitgevoerd voor de landelijke spreiding van de kentallen.

1.4 LEESWIJZER

Hoofdstuk 1 geeft een inleiding van het project, waarbij de aanleiding, het doel, de uitgangspunten en de werkwijze is toegelicht. Hoofdstuk 2 presenteert de resultaten van analyses die zijn uitgevoerd ten behoeve van het bepalen van de volumieke gewichten voor klei en veen. De resultaten met betrekking tot de sterkteparameters S , φ_{∞}' , c' en φ' zijn toegelicht in Hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 presenteert vervolgens de analyse naar de landelijke spreiding van de parameters. In Hoofdstuk 5 wordt tenslotte afgesloten met de conclusies en aanbevelingen.

2

ANALYSES VOLUMIEKE GEWICHT

Voor de volumieke gewichten zijn de resultaten van de classificatieproeven gebruikt. Voor het volumieke gewicht is de insteek om van grof naar fijn te werken. Dat wil zeggen dat de klasse-indeling in eerste instantie vrij grof is gekozen, namelijk alle kleimonsters bij elkaar en alle veenmonsters bij elkaar. Vervolgens is dit verder uitgesplitst in klei- en veensoorten en indien nodig nog verder uitgesplitst. De uitsplitsingen zijn gedaan op basis van de beschrijving van de grond conform de NEN5104, zoals deze per monster is gespecificeerd binnen de databases. De analyses zijn nader toegelicht in onderstaande paragrafen.

In stabiliteitsanalyses wordt onderscheid gemaakt tussen nat, droog en verzadigd volumiek gewicht (γ_{nat} , γ_{drg} en γ_{sat} respectievelijk). In het WBI worden op dit moment de waarden uit Tabel 2.1 voorgeschreven voor het verzadigde volumegewicht [Rijkswaterstaat, 2021]. Het is echter niet mogelijk om uit de beschikbare dataset het verzadigde volumieke gewicht op een betrouwbare manier af te leiden, omdat de verzadigingsgraad van de beproefde monsters over het algemeen lager is dan 100% en de verzadigingsgraad geen parameter is die in de STOWA database wordt vastgelegd. In relatie tot de waarden in Tabel 2.1 zullen de waarden in onderstaande paragrafen daardoor waarschijnlijk vaak ook iets lager uitvallen.

TABEL 2.1 TE VERWACHTEN WAARDEN VAN DE VERZADIGDE VOLUMIEKE GEWICHTEN γ_{sat} VOLGENS DE SCHEMATISERINGSHANDLEIDING MACROSTABILITEIT [RIJKSWATERSTAAT, 2021]

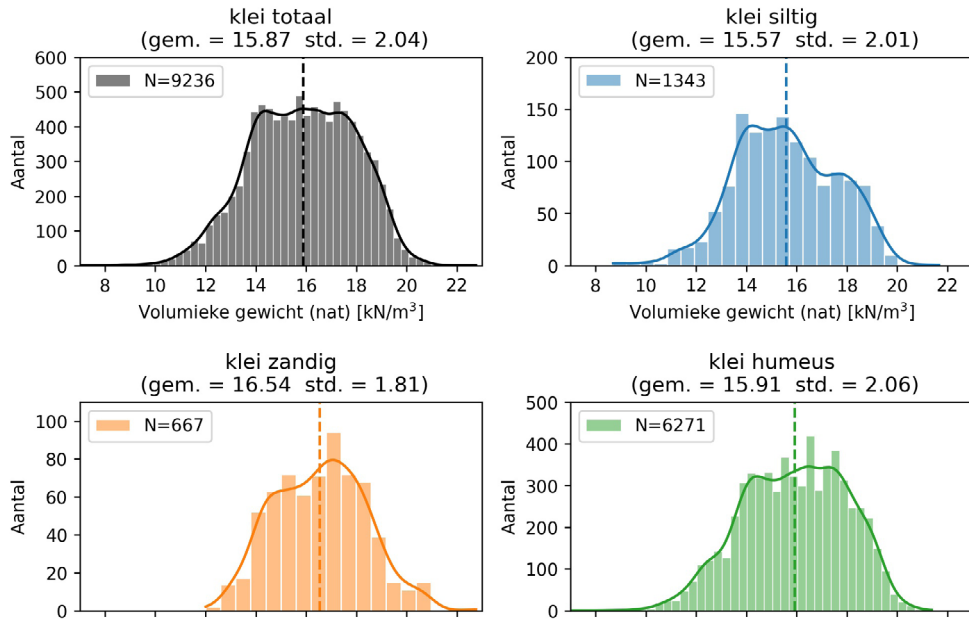
Grondsoort	Verzadigd volumiek gewicht [kN/m ³]
Veen mineraalarm	10 – 11
Veen kleiig	11 – 12
Klei organisch	12 – 14
Klei zandig	16 – 21
Klei siltig	16 – 21

2.1 KLEI

Figuur 2.1 geeft de histogrammen van de natte volumieke gewichten weer voor verschillende soorten klei. Hierbij zijn monsters met een watergehalte kleiner dan 10% niet meegenomen. Het is te zien dat zandige klei duidelijk zwaarder is dan siltige en humeuze klei en een kleinere spreiding heeft. Siltige klei is juist iets lichter. De histogrammen zijn redelijk breed, waardoor een verdere verfijning waarschijnlijk nuttig is. Daarnaast bevatten de histogrammen waarden die te hoog of te laag zijn voor de kleisoort waaraan ze zijn toegekend. Dit impliceert dat er bij het classificeren van de grond volgens NEN5104 waarschijnlijk in sommige gevallen fouten zijn gemaakt. Daarom is een extra filter meegenomen, door naar het watergehalte te kijken.

FIGUUR 2.1

NAT VOLUMIEKE GEWICHT VOLGENS CLASSIFICATIEPROEF, VOOR 'GROVE' KLEI CLASSIFICATIES



Op basis van de porositeit n en de verzadigingsgraad S kan een verwachtingsbandbreedte gedefinieerd worden waarbinnen het watergehalte van een monster zou moeten liggen:

$$\rho_n = \rho_s \cdot (1 - n) \cdot S + n \cdot S \cdot \rho_w \rightarrow S = \frac{\rho_n}{\rho_s \cdot (1 - n) + n \cdot \rho_w} \quad (8)$$

waarin ρ_w de dichtheid van water is ($\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) en ρ_s de dichtheid van de grondkorrels (niet-organisch materiaal: $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ en organisch materiaal: $\rho_s = 2500 \text{ kg/m}^3$). Op basis van de bandbreedte van het natte volumieke gewicht in Tabel 2.1 is de bandbreedte van de verzadigingsgraad geschat. Dit is weergegeven in Tabel 2.2.

TABEL 2.2

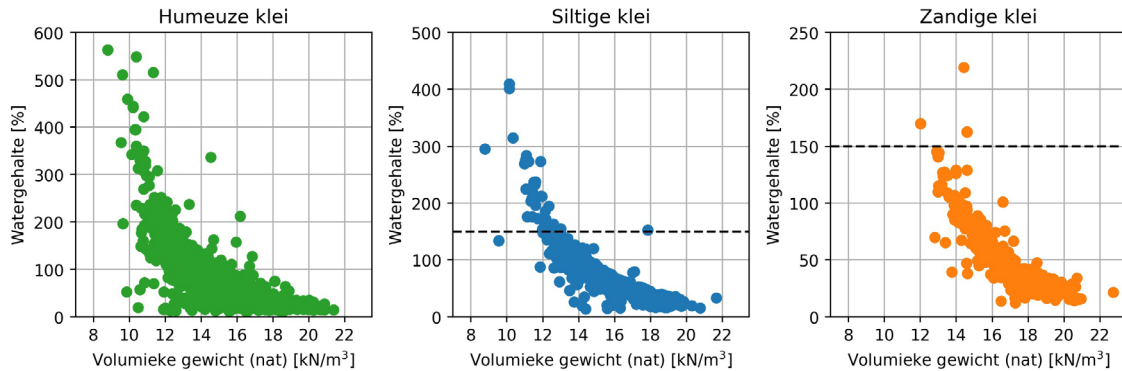
BANDBREEDTE VOOR DE VERZADIGINGSGRAAD VAN KLEISOORTEN

Grondsoort	Nat volumegewicht [kN/m³]	Porositeit [-]	Bandbreedte verzadigingsgraad S [-]
Siltige klei	10 - 20	0.4	0.51 - 1.02
Humeuze klei	10 - 20	0.4	0.54 - 1.07
Zandige klei	12 - 22	0.4	0.60 - 1.13

en zou op basis van deze bandbreedte een extra kwaliteitsfilter aan de data kunnen toevoegen. Binnen dit project is echter gekozen voor een iets pragmatische aanpak, door te kijken naar het watergehalte van de monsters en daarvoor maxima/minima vast te stellen waarop data is gefilterd.

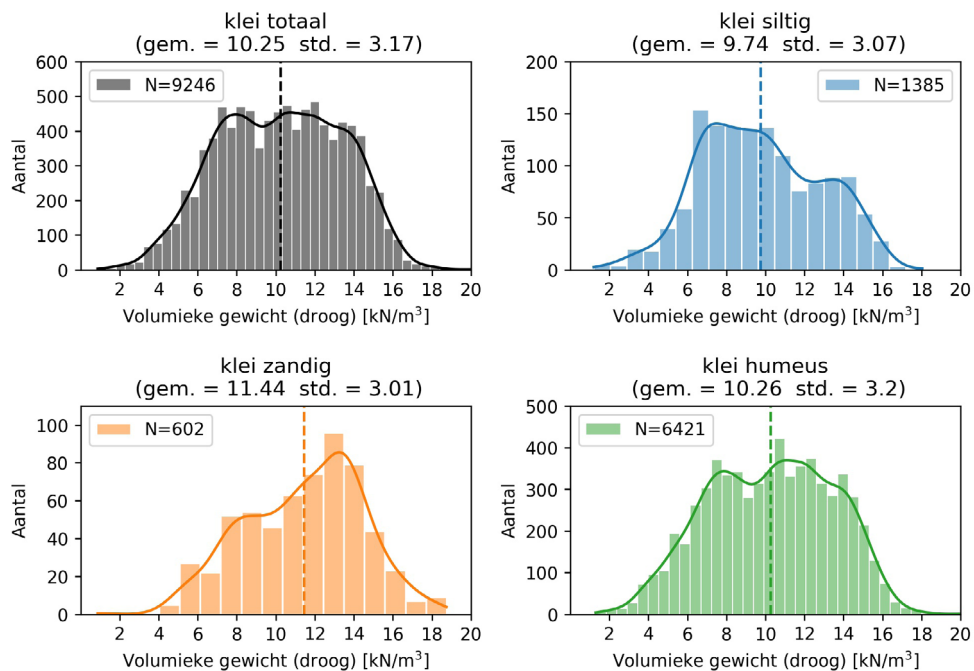
In Figuur 2.2 zijn de volumieke gewichten uitgezet tegen de watergehalten van het monster, waarbij onderscheid is gemaakt tussen humeuze, siltige en zandige klei. Het is te zien dat het watergehalte van humeuze klei het hoogst is en het watergehalte van zandige klei het laagst. Dit is in lijn der verwachting, aangezien organische klei meer water vasthoudt dan zandige klei. Daarnaast blijken bij siltige klei redelijk veel monsters voor te komen met een relatief hoog watergehalte, terwijl bekend is dat klei met een watergehalte van groter dan 150% hoogstwaarschijnlijk organische klei is. In de vervolgstappen van de analyses zijn de betreffende monsters dan ook uit de selectie van siltige klei gefilterd. Hetzelfde geldt voor zandige klei.

FIGUUR 2.2 NAT VOLUMIEKE GEWICHT UITGEZET TEGEN HET WATERGEHALTE VAN HET MONSTER



De histogrammen voor het droge volumieke gewicht zijn in Figuur 2.3 weergegeven voor een grove klasse indeling van klei. Opgemerkt wordt dat hiervoor alle classificatieproeven zijn gebruikt, zonder de selectie op basis van het watergehalte. Het is te zien dat de spreiding duidelijk groter is dan bij het natte volumieke gewicht. Dit kan worden verklaard door de manier hoe het droge volumieke gewicht bepaald wordt. Voor het bepalen van het natte volumegewicht wordt de massa en het volume van het monster gemeten. Vervolgens wordt het monster uitgedroogd. Van het droge monster wordt opnieuw de massa bepaald, maar niet opnieuw het volume. Het droge volumegewicht wordt dus niet helemaal correct bepaald in de praktijk en dit zou de grote spreiding kunnen verklaren. Het droge volumieke gewicht wordt echter ook nauwelijks gebruikt in de praktijk.

FIGUUR 2.3 DROOG VOLUMIEKE GEWICHT VOLGENS CLASSIFICATIEPROEF, VOOR 'GROVE' KLEI CLASSIFICATIES

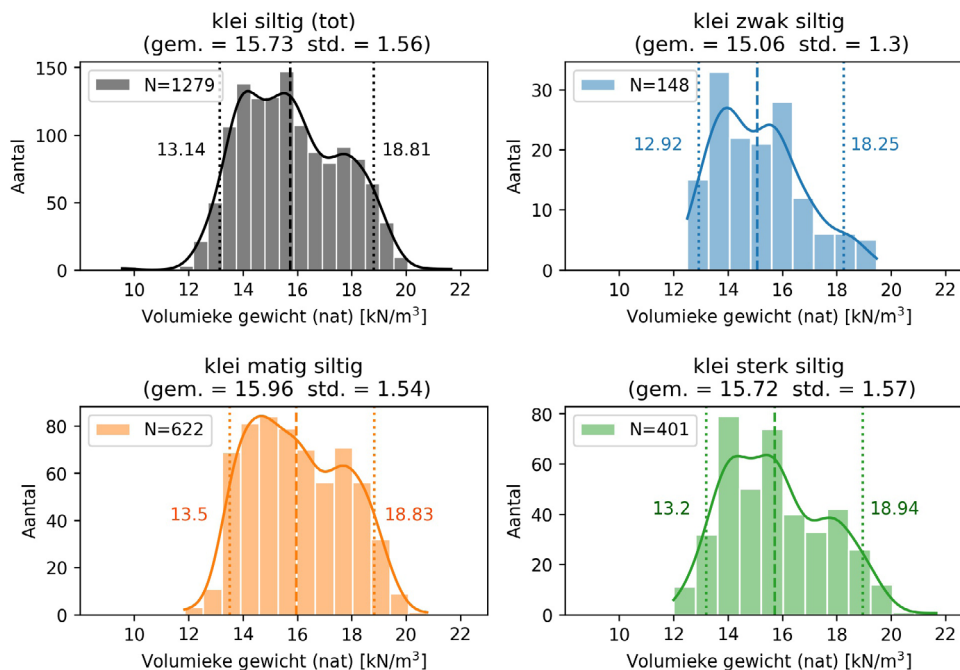


De drie kleisoorten zijn verder uitgesplitst in de categorieën 'zwak', 'matig' en 'sterk' conform NEN5104, om te beoordelen of deze verfijning zorgt voor andere conclusies met betrekking tot het gemiddelde volumieke gewicht en de spreiding van een klasse.

2.1.1 SILTIGE KLEI

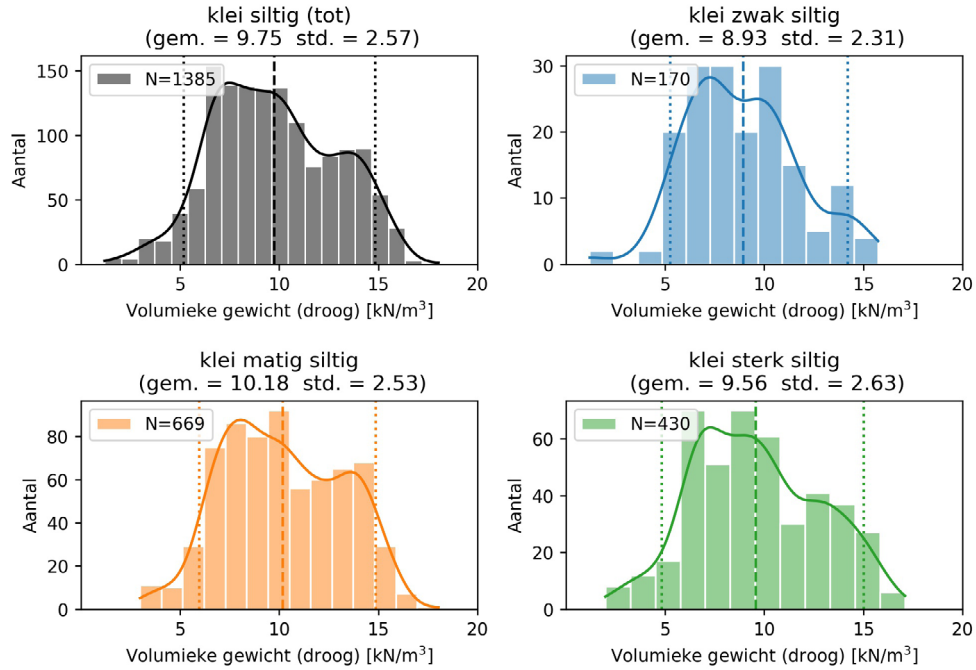
Voor siltige klei zijn de histogrammen van de volumieke gewichten na verfijning weergegeven in Figuur 2.4. Hierbij is gebruik gemaakt van de proevenselectie waarvoor het watergehalte tussen 10% en 150% ligt, omdat is aangenomen dat dit realistische waarden zijn voor het watergehalte van siltige klei, ter bepaling van het natte volumieke gewicht. Daarnaast is voor de bepaling van het gemiddelde natte volumieke gewicht en de spreiding gebruikt van de proeven die vallen binnen het 90% interval (tussen de gestipte lijnen, die de 5% en 95% percentielwaarde weergeven). De stippellijn geeft het gemiddelde weer.

FIGUUR 2.4 NAT VOLUMIEKE GEWICHT VOLGENS CLASSIFICATIEPROEF, VOOR DE DRIE CATEGORIEËN SILTIGE KLEI



In Figuur 2.5 zijn de histogrammen weergegeven voor het droge volumieke gewicht van de drie klassen van siltige klei. Hierbij is wederom geen filter op basis van het watergehalte toegepast. De spreiding is nog steeds vrij groot, duidelijk groter dan voor het natte volumieke gewicht.

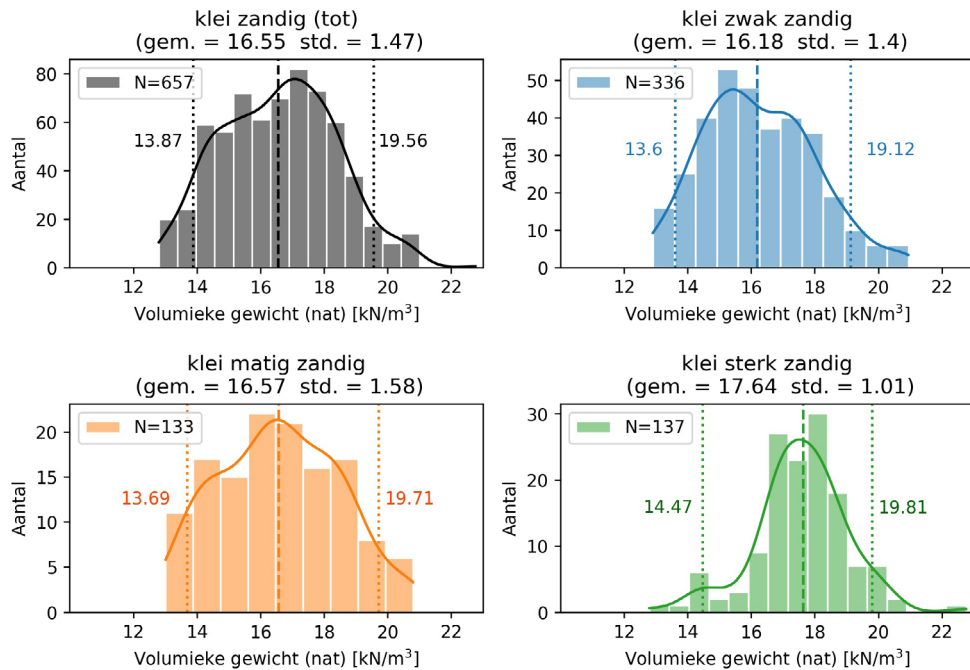
FIGUUR 2.5 DROOG VOLUMIEKE GEWICHT VOOR VERSCHILLENDE CATEGORIEËN SILTIGE KLEI



2.1.2 ZANDIGE KLEI

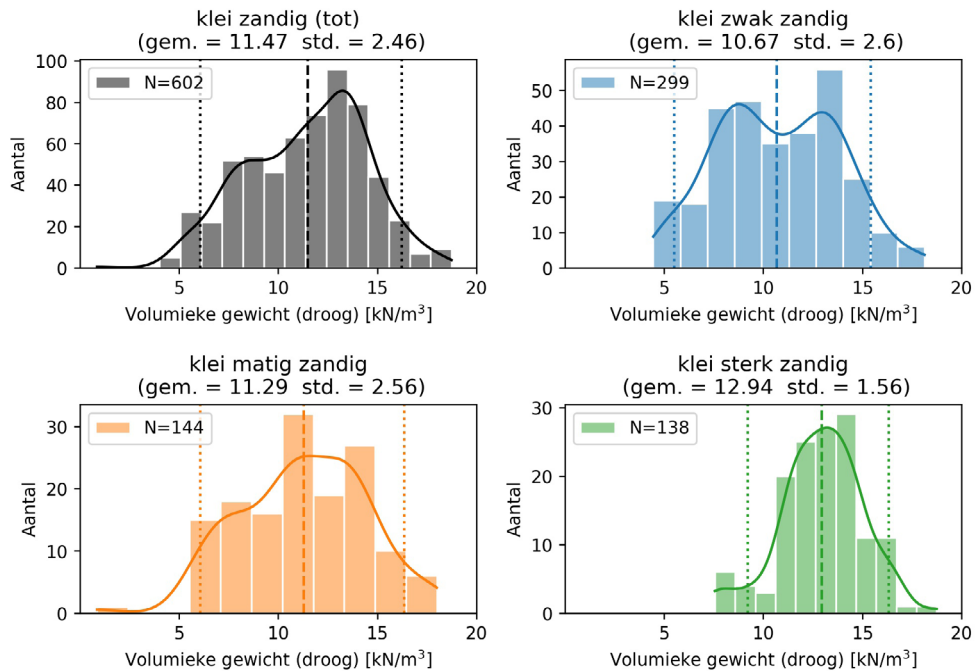
Voor zandige klei is de uitsplitsing verfijnd naar zwak, matig en sterk zandig, zoals weergegeven in Figuur 2.6. Hierbij is wederom gebruik gemaakt van de proevenselectie waarvoor het watergehalte tussen 10% en 150% ligt en is voor de bepaling van de kentallen gebruik gemaakt van de proeven die vallen binnen het 90% interval. De histogrammen laten zien dat deze verfijning van belang is: het gemiddelde volumieke gewicht voor sterk zandige klei is bijvoorbeeld duidelijk groter dan voor zwak zandige klei en de spreiding duidelijk kleiner.

FIGUUR 2.6 NAT VOLUMIEKE GEWICHT VOOR VERSCHILLENDE CATEGORIEËN ZANDIGE KLEI



In Figuur 2.7 zijn de histogrammen van het droge volumieke gewicht voor zandige klei weergegeven. Wederom is veel spreiding te zien en is sterk zandige klei een significant zwaarder dan zwak zandige klei.

FIGUUR 2.7 DROGE VOLUMIEKE GEWICHT VOOR VERSCHILLENDE CATEGORIËN VAN ZANDIGE KLEI

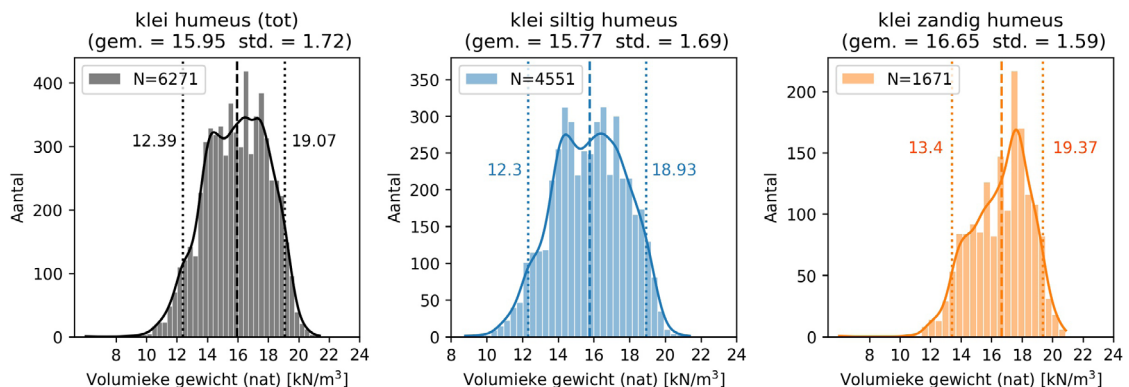


2.1.3 HUMEUZE KLEI

Humeuze klei kan op twee manieren verder verfijnd worden in klassen: (1) op basis van zandige humeuze klei versus siltige humeuze klei; of (2) op basis van zwak, matig of sterk humeuze klei. Beide manieren zijn in beeld gebracht.

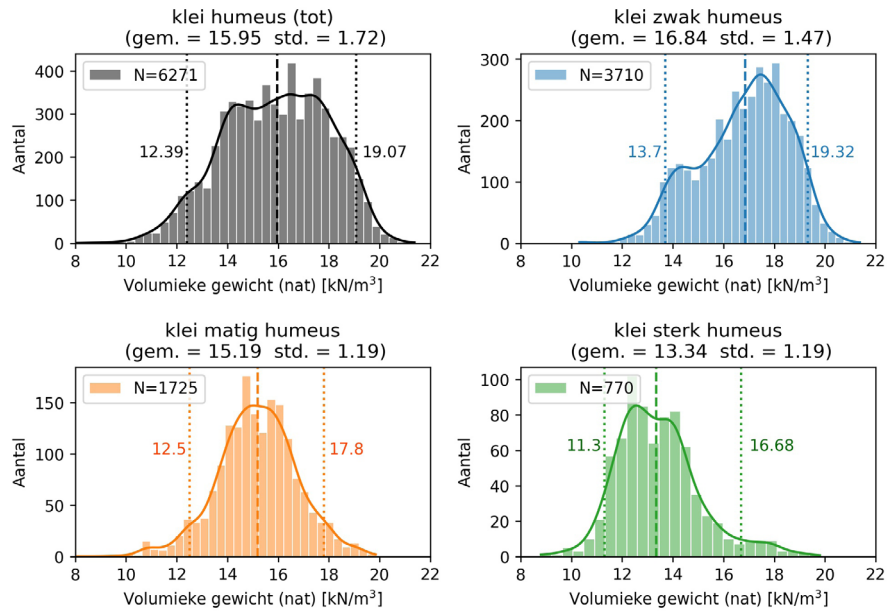
De verfijning op basis van de eerste manier is weergegeven in Figuur 2.8. Het is te zien dat zandig humeuze klei een groter volumiek gewicht heeft dan siltig humeuze klei.

FIGUUR 2.8 NAT VOLUMIEKE GEWICHT VOOR HUMEUZE KLEI, INDELING O.B.V. SILTIG VERSUS ZANDIG



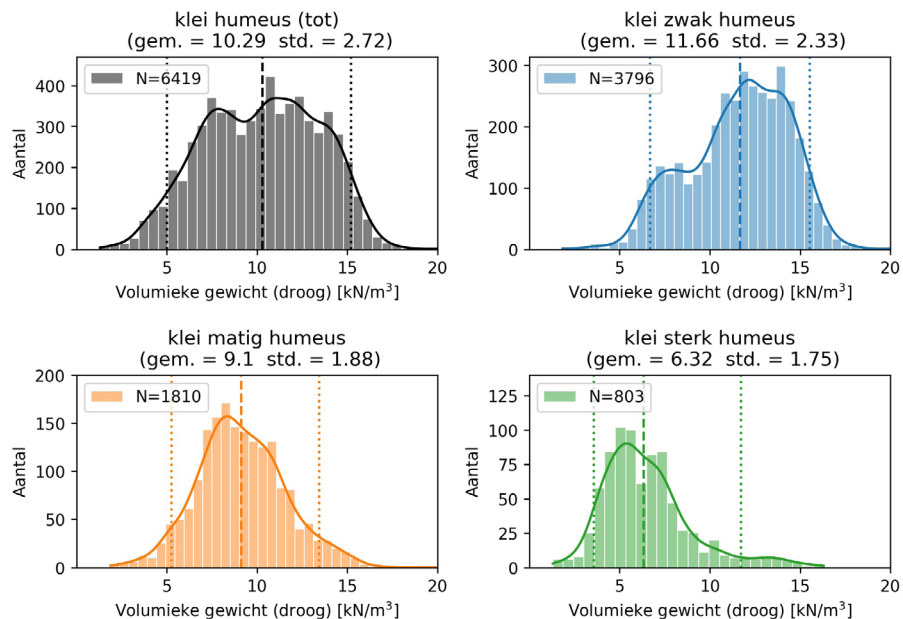
Wanneer de verfijning van klassen wordt gedaan op basis van de classificaties ‘zwak’, ‘matig’ en ‘sterk’ humeus, dan resulteert dit in de histogrammen van Figuur 2.9. Het is te zien dat sterk humeuze klei duidelijk lichter is dan zwak humeuze klei. De spreiding is in deze histogrammen kleiner dan bij de histogrammen van Figuur 28. Bovendien is er een groter verschil in volumiek gewicht te zien tussen deze klassen ten opzichte van de klassen uit Figuur 2.8. Het is daarom beter om humeuze klei verder te classificeren volgens ‘zwak’, ‘matig’ en ‘sterk’.

FIGUUR 2.9 NAT VOLUMIEKE GEWICHT VOOR HUMEUZE KLEI, INDELING O.B.V. ZWAK, MATIG OF STERK HUMEUS



Op basis van dezelfde klassenindeling is het droge volumieke gewicht afgeleid voor zwak, matig en sterk humeuze klei. Dit is weergegeven in Figuur 2.10. De spreiding is wederom groot en er is daarnaast groot verschil in gemiddeld droog volumiek gewicht.

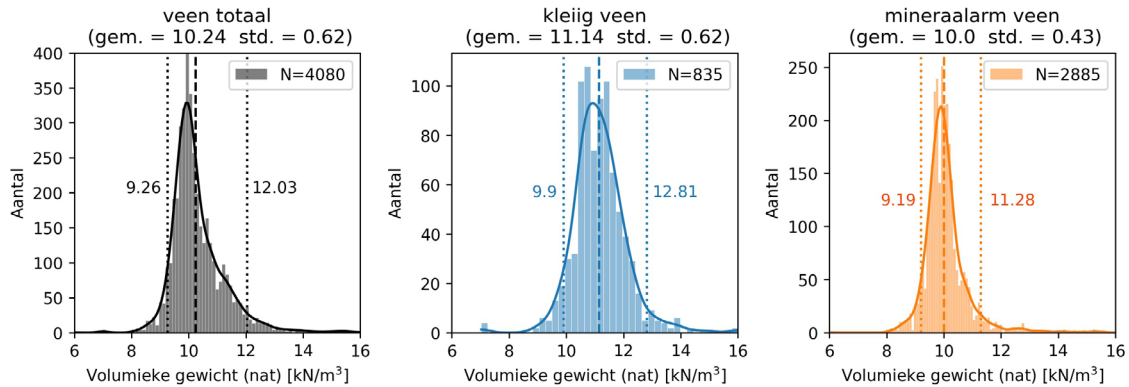
FIGUUR 2.10 DROOG VOLUMIEKE GEWICHT VOOR HUMEUZE KLEI, SELECTIE O.B.V. ZWAK, MATIG OF STERK HUMEUS



2.2 VEEN

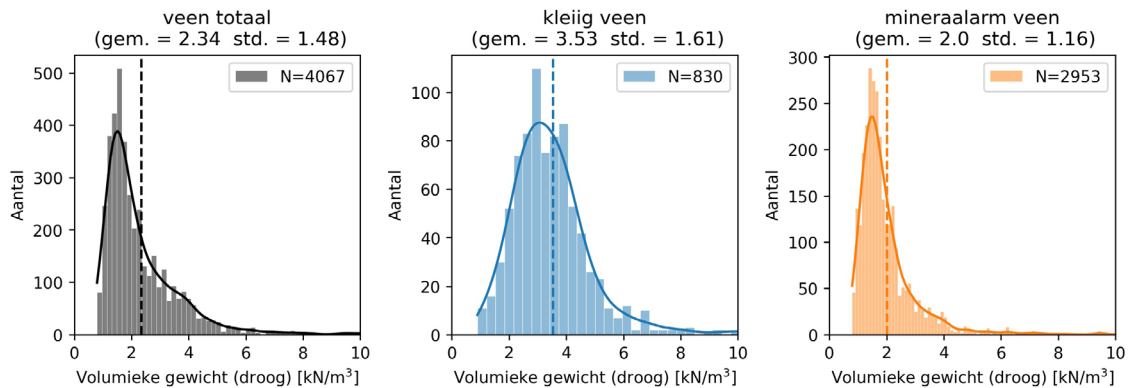
Figuur 211 geeft de histogrammen weer voor veen. In het linker figuur zijn alle veenmonsters samen genomen, in het middelste figuur zijn kleiige veenmonsters geselecteerd en in het rechter figuur mineraalarme veenmonsters. Het is te zien dat kleiig veen zwaarder is dan mineraalarm veen en dat beiden een relatief kleine spreiding vertonen. Voor de bepaling van het gemiddelde natte volumieke gewicht en de spreiding zijn de proeven die vallen binnen het 90% interval beschouwd (tussen de gestipte lijnen, die de 5% en 95% percentielwaarde weergeven). De stippellijn geeft het gemiddelde weer.

FIGUUR 2.11 NAT VOLUMIEKE GEWICHT VOOR VEENSOORTEN, VOLGENS CLASSIFICATIEPROEF



Wat betreft het droge volumieke gewicht, is de spreiding groter dan bij het natte volumieke gewicht, met name aan de rechter kant van het gemiddelde. Dit is te zien in de histogrammen van Figuur 2.12. De spreiding is vooral bij kleiig veen relatief groot.

FIGUUR 2.12 DROOG VOLUMIEKE GEWICHT VOOR VEEN CLASSIFICATIES

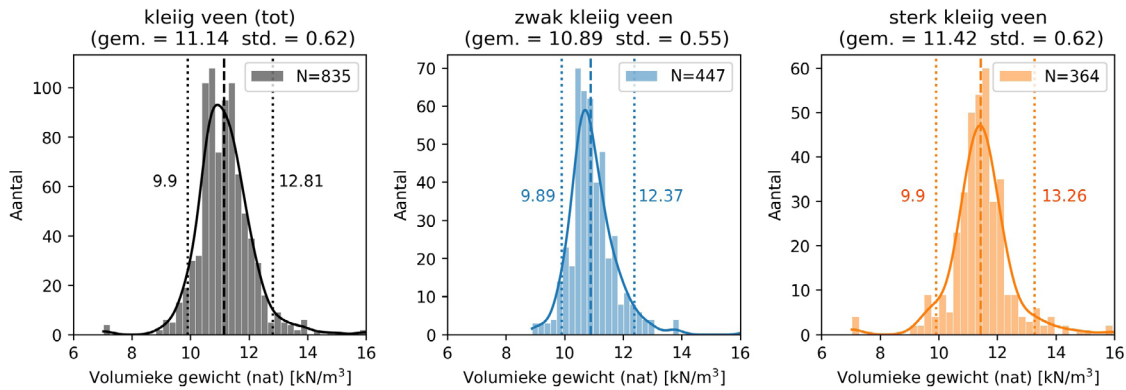


Mineraalarm veen kan niet verder uitgesplitst worden, omdat binnen de NEN5104 geen gedetailleerdere categorieën voor mineraalarm zijn voorgeschreven. Voor kleiig veen is dit wel mogelijk.

2.2.1 KLEIIG VEEN

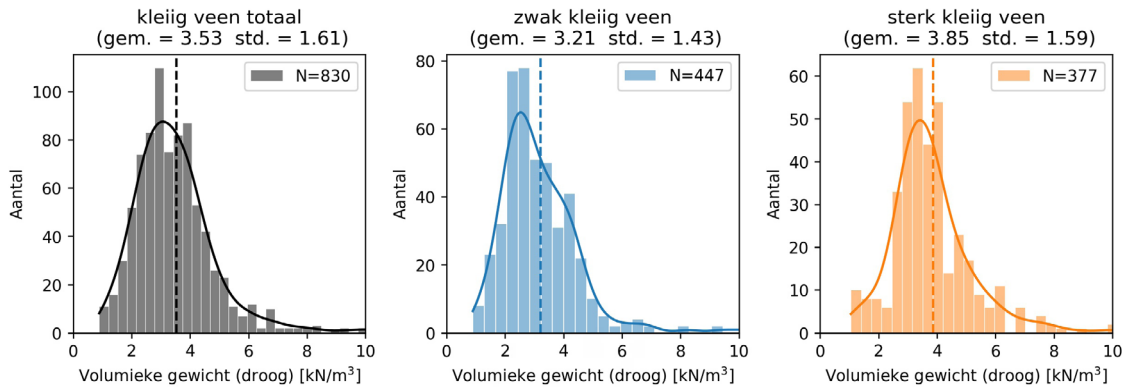
Er zijn maar zes monsters die omschreven zijn als 'matig kleiig veen' of 'vk2'. Er kan dan ook geen betrouwbaar resultaat behaald worden voor deze categorie. Voor zwak kleiig veen en sterk kleiig veen is dit wel mogelijk. Dit is weergegeven in Figuur 2.13. Sterk kleiig veen blijkt zwaarder te zijn dan licht kleiig veen.

FIGUUR 2.13 NAT VOLUMIEKE GEWICHT VOOR VERSCHILLENDE CATEGORIËN KLEIIG VEEN



De histogrammen voor het droge volumieke gewicht voor kleilig veen zijn weergegeven in Figuur 2.14. Wederom is de spreiding met name aan de rechter kant van het gemiddelde vrij groot.

FIGUUR 2.14 DROOG VOLUMIEKE GEWICHT VOOR VERSCHILLENDE CATEGORIËN KLEIIG VEEN



2.3 SAMENVATTING

In Tabel 2.3 zijn de resulterende gemiddelde waarden en standaarddeviaties weergegeven voor de verschillende grondsoorten, in vergelijking met de waarden uit de Schematiseringshandleiding Macrostabiteit [Rijkswaterstaat, 2021], zoals weergegeven in Tabel 2.1. Belangrijk is om op te merken dat de waarden uit Tabel 2.1 verzadigde volumieke gewichten zijn, terwijl de hier afgeleide waarden natte volumieke gewichten zijn (niet compleet verzadigd). Dit verklaart mogelijk waarom het afgeleide volumieke gewicht over het algemeen aan de lage kant ligt van de range uit de schematiseringshandleiding.

TABEL 2.3 OVERZICHT VAN DE RESULTERENDE KENTALLEN VOOR HET NATTE VOLUMIEKE GEWICHT, IN VERGELIJKING MET HET VERZADIGDE VOLUMIEKE GEWICHT VOLGENS [RIJKSWATERSTAAT, 2016].

Grondsoort	Verzadigd volumiek gewicht (WBI) [kN/m ³]	Nat volumiek gewicht (o.b.v. dataset) [kN/m ³]
Veen mineraalarm	10 – 11	$\mu = 10.0$; $\sigma = 0.43$
Veen kleilig	11 – 12	$\mu = 11.14$; $\sigma = 0.62$
Klei organisch	12 – 14	$\mu = 15.95$; $\sigma = 1.72$
Klei zandig	16 – 21	$\mu = 16.55$; $\sigma = 1.47$
Klei siltig	16 – 21	$\mu = 15.73$; $\sigma = 1.56$

3

ANALYSES STERKTE

Voor het bepalen van de sterkteparameters is voor klei gebruik gemaakt van triaxiaalproeven (TRX) en voor veen van direct simple shearproeven (DSS). Hierbij zijn sterkteparameters afgeleid voor verschillende rekniveaus: 2%, 5%, pieksterkte en eindrek.

De volgende sterkteparameters zijn afgeleid:

- Ongedraineerde schuifsterkte ratio S volgens het SHANSEP model;
- Effectieve hoek van inwendige wrijving φ_{cs} bij grote rekken (critical state);
- Cohesie c' met het Mohr-Coulomb model;
- Effectieve hoek van inwendige wrijving φ' met het Mohr-Coulomb model.

Voordat deze sterkteparameters zijn afgeleid is voor verschillende rekniveaus geanalyseerd welke selectiestappen van belang zijn. Hierbij is gekeken naar consolidatiegraad (OCR), consolidatiewijze (isotroop/anisotroop) en grondsoort (klei/veen).

In eerste instantie is voor deze analyses geen uitsplitsing gemaakt op basis van kleisoort. Vervolgens is dit voor een aantal analyses wel gedaan, om te onderzoeken of de getrokken conclusies anders zouden zijn voor specifieke kleisoorten (bijv. siltige klei). De resultaten daarvan zijn weergegeven in Bijlage A. Voor de analyses met betrekking tot een specifieke kleisoort is gebruik gemaakt van de proeven waarvoor het natte volumieke gewicht binnen de 90% range ligt en het filter op basis van watergehalte zoals omschreven in het vorige hoofdstuk. Hiermee wordt de kans op onlogische fysische combinaties beperkt. In Bijlage A zijn daarnaast resultaten gepresenteerd voor 15% rek.

3.1 KLEI

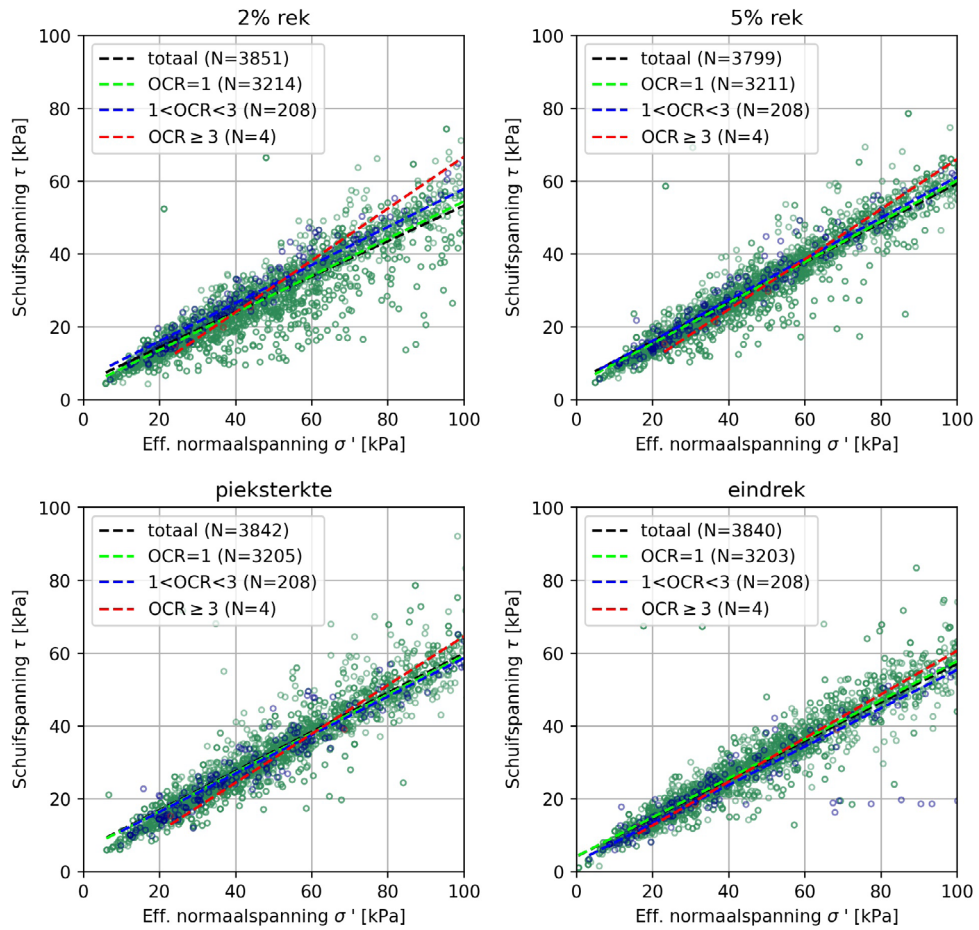
3.1.1

CONSOLIDATIEGRAAD

In Figuur 3.1 zijn de gemeten schuifspanningen uitgezet tegen het spanningsniveau, voor verschillende rekniveaus, waarbij telkens normaal geconsolideerde en overgeconsolideerde monsters met elkaar zijn vergeleken. Ieder punt betreft een combinatie van t' en s met $t=1/2 * (sv'-sh')$ en $s'=1/2*(sv'+sh')$. Het is te zien dat normaal geconsolideerde monsters (OCR=1) bij lage rekken een ander gedrag vertonen dan sterk overgeconsolideerde monsters (OCR \geq 3). Monsters die licht overgeconsolideerd zijn (1<OCR<3) vertonen daarentegen vrijwel hetzelfde gedrag als normaal geconsolideerde monsters.

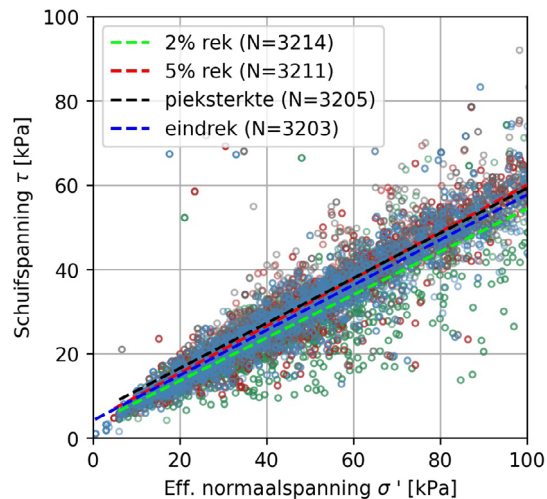
Op basis van deze analyse is besloten om overgeconsolideerde monsters (OCR>3) niet mee te nemen bij het afleiden van de sterkteparameters, omdat te zien is dat deze een ander gedrag vertonen dan normaal geconsolideerde monsters. De hoeveelheid monsters met OCR=1 is ca. 3200, en dus groot genoeg voor betrouwbare resultaten van de sterkteparameters. Daarom is besloten de licht overgeconsolideerde (= OCR tussen 1 en 3) monsters weg te laten uit de selectie.

FIGUUR 3.1 VERGELIJKING S,T-DIAGRAMMEN VOOR NORMAAL GECONSOLIDEERDE VS. OVERGECONSOLIDEERDE KLEIMONSTERS TIJDENS TRIAXIAALPROEF



In Figuur 3.1 zijn daarnaast de verschillende rekniveaus in één s,t-diagram uitgezet, voor normaal geconsolideerde monsters (OCR=1). Het is te zien dat het gedrag bij de verschillende rekniveaus redelijk vergelijkbaar is. Van lage naar hoge rek wordt de trendline een beetje steiler (τ wordt groter). Daarnaast is te zien dat bij hoge rekken de cohesie naar nul gaat, zoals verwacht.

FIGUUR 3.2 VERGELIJKING VAN DE S,T-DIAGRAMMEN VOOR NORMAAL GECONSOLIDEERDE KLEIMONSTERS BIJ VERSCHILLENDE REKNIVEAUS TIJDENS TRIAXIAALPROEF



In bovenstaande figuren zijn datapunten te zien die fysisch onmogelijk zijn voor normaal geconsolideerde kleimonsters, om verschillende redenen:

1. t is altijd kleiner dan s : In een triaxiaalproef kunnen geen trekspanningen worden gemeten. Bij lage spanningen en/of organische materialen kunnen in een ongedraineerde schuifproef de waterspanningen zo hoog worden dat trekspanningen worden opgewekt. Deze spannings-toestanden liggen op de zogenaamde *tension cut-offline* (TCO). Alle metingen boven de TCO in een ongedraineerde triaxiaalproef zijn daarmee onbetrouwbaar. In een s - t diagram is dit een lijn van 1:1.
2. De grootte van de waterspanningen Δu , in relatie tot normaal geconsolideerd. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van de coëfficiënten van Skempton [TAW, 1988] en [Verruijt, A., 2001]:

$$\Delta u = B[\Delta\sigma - (1 - 2A)\Delta\tau]$$

waarbij A bij normaal geconsolideerde klei gelijk is aan ca. 0,5 tot 1,0 en $B \approx 1$ bij volledig verzadigde monsters. Op basis hiervan kan een relatie worden afgeleid tussen σ en τ en kunnen daar fysisch mogelijke boven- en ondergrenzen gesteld worden.

3. Met betrekking tot de korrelspanningsverhouding k_0 geldt dat:

$$k_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \rightarrow \sigma'_h = k_0 \cdot \sigma'_v$$

waarbij $k_0 \approx 0,3$. Op basis van de definities van s en t kan daarmee een ondergrens voor de maximale sterkte bij normaalgeconcolideerde grond gesteld worden:

$$\frac{t}{s} = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{\sigma_v + \sigma_h} = \sigma_v \cdot \frac{1 - k_0}{1 + k_0} = \sigma_v \cdot \frac{1 - 0,3}{1 + 0,3} = 0,54 \cdot \sigma_v$$

Binnen dit project zijn geen selecties uitgevoerd op basis van bovenstaande criteria, maar dit zou een stap kunnen zijn binnen vervolgonderzoek voor een verdere aanscherping van de datakwaliteit.

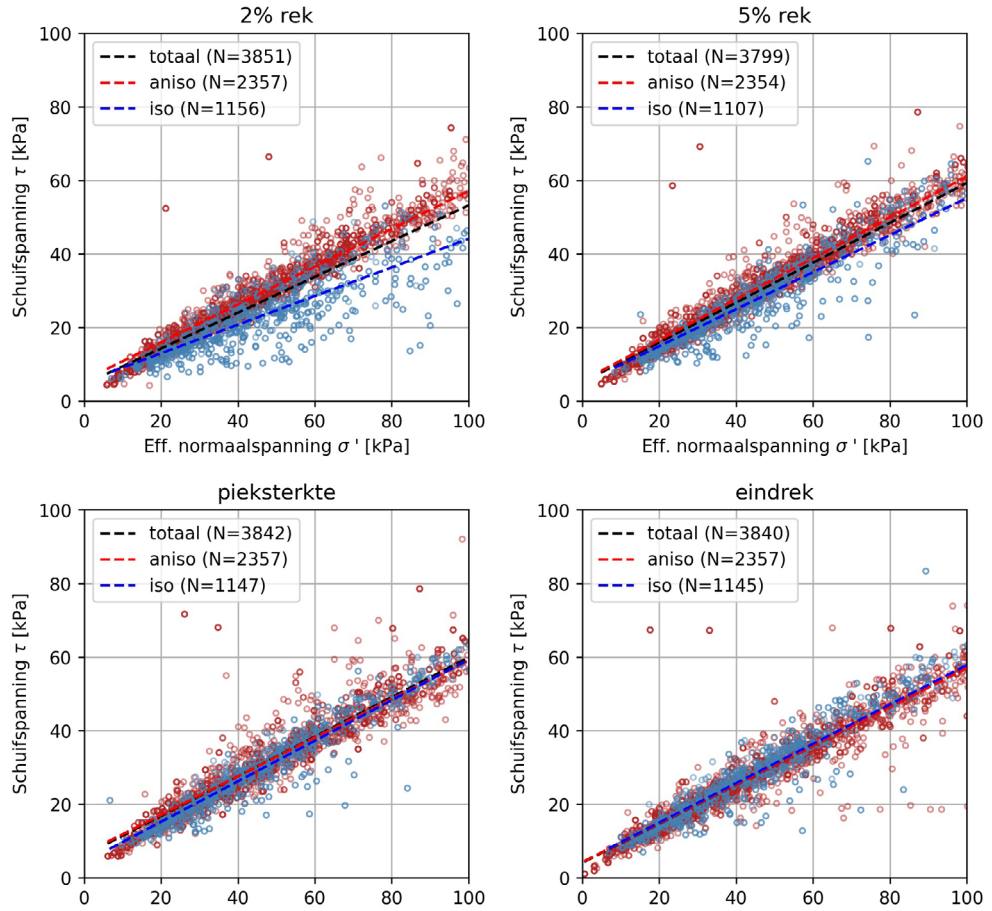
3.1.2 CONSOLIDATIEWIJZE

In Figuur 3.3 zijn de schuifspanningen uitgezet tegen het spanningsniveau, voor verschillende rekniveaus, waarbij telkens onderscheid is gemaakt tussen isotroop en anisotroop geconsolideerde triaxiaalproeven. Dezelfde vergelijking is ook gemaakt per kleisoort, dit is weergegeven in Bijlage A.2. Het beeld voor siltige en zandige klei is redelijk vergelijkbaar met het beeld uit Figuur 3.3. Bij humeuze klei zijn de verschillen tussen isotroop en anisotroop ook bij 5% en 15% rek zichtbaar en zelfs nog een beetje bij de eindrek.

Indien voorafgaand aan de vergelijking tussen isotroop en anisotroop geselecteerd is op enkel normaal geconsolideerde proeven (OCR=1), dan geeft dit ongeveer hetzelfde beeld. Dit is weergegeven in Figuur 6.5 in Bijlage A.3.

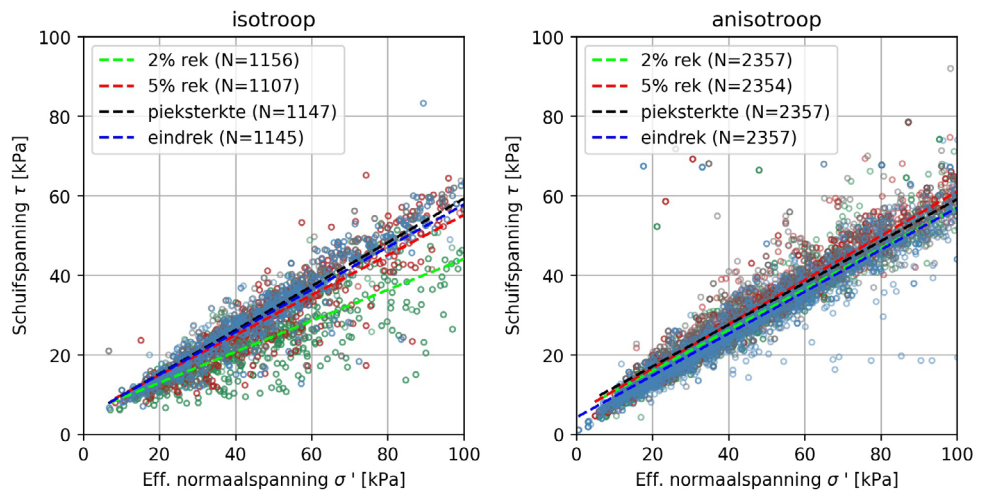
Hieruit blijkt dat bij de afleiding van de sterkteparameters onderscheid maken tussen isotroop en anisotroop van belang is, zeker bij kleine rekken.

FIGUUR 3.3 VERGELIJKING S,T-DIAGRAMMEN VOOR ISOTROPE EN ANISOTROPE TRIAXIAALPROEVEN VOOR ALLE KLEIMONSTERS



In Figuur 3.4 is daarnaast een vergelijking gemaakt tussen de s,t-diagrammen bij verschillende rekniveaus, voor isotrope kleimonsters en voor anisotrope kleimonsters. Het is te zien dat isotrope kleimonsters bij 2% rek een ander gedrag vertonen dan bij hogere rekniveaus. Bij anisotrope kleimonsters is dit niet het geval: het gedrag is bij alle rekniveaus ongeveer hetzelfde.

FIGUUR 3.4 VERGELIJKING VAN S,T-DIAGRAMMEN VOOR VERSCHILLENDE REKNIVEAUS VOOR ISOTROPE (LINKS) EN ANISOTROPE (RECHTS) KLEIMONSTERS, TIJDENS TRIAXIAALPROEF



3.1.3 ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S

De bepaling van de ongedraineerde schuifsterkte ratio S is gedaan op basis van triaxiaalproeven (per rekniveau), op de werkwijze zoals toegelicht in paragraaf 1.3.2. Voor de bepaling is gebruik gemaakt van proefresultaten die voldoen aan de volgende criteria:

- De grondclassificatie volgens NEN5104 valt in de betreffende kleicategorie.
- De betreffende spanningen (s, t) zijn niet nul;
- Het kleimonster is anisotroop geconsolideerd (of isotroop, zie Bijlage A.4);
- Het kleimonster is normaal geconsolideerd ($OCR = 1$);
- Het natte volumegewicht van het kleimonster valt binnen het 90% interval, bepaald op basis van de natte volumieke gewichten uit de classificatieproef.
- Indien het gaat om siltige of zandige klei, is het watergehalte kleiner dan 150%.

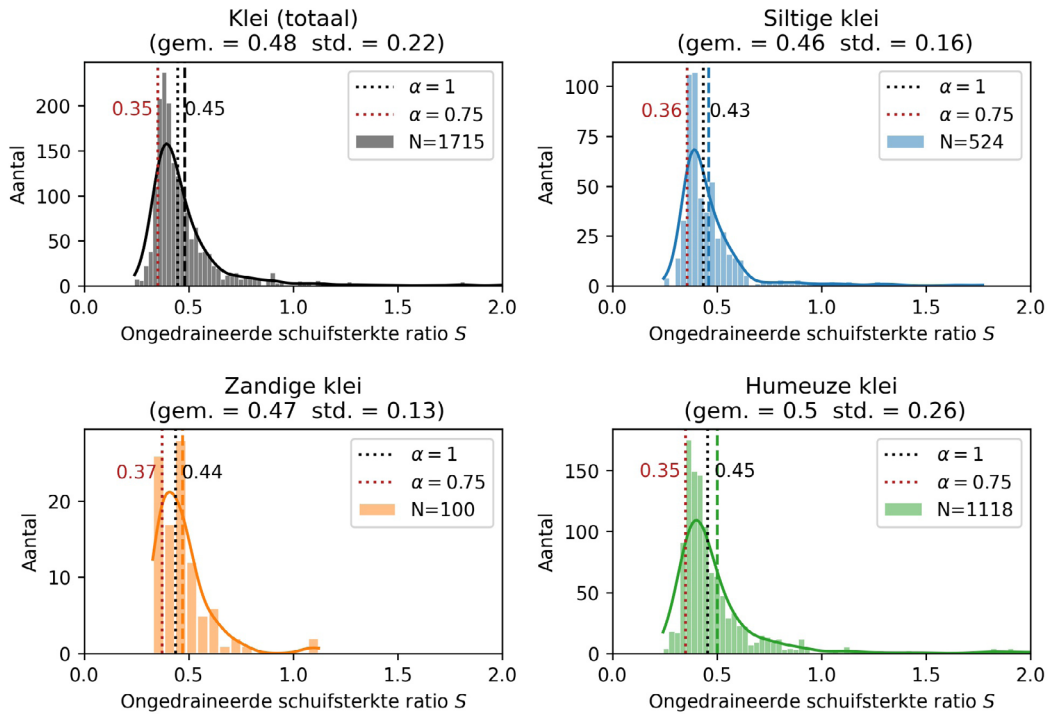
Telkens zijn weer eerst de drie 'grove' klei categorieën bekeken en vervolgens is verfijnd naar 'zwak', 'matig' en 'sterk'. Dit is per relevant rekniveau gedaan (2%, 5%, piek en eind). In onderstaande subparagrafen zijn de resultaten weergegeven voor 'grove' klei categorieën, voor anisotrope normaal geconsolideerde monsters, per rekniveau. De resultaten voor isotrope, normaal geconsolideerde proeven zijn te vinden in Bijlage A.4 en de resultaten verfijnde klei klassen zijn direct gepresenteerd in dit hoofdstuk.

BEPALING S BIJ 2% REK

In Figuur 3.5 zijn de resultaten weergegeven voor anisotrope kleimonsters bij 2% rek. Per kleisoort is op basis van de proevenselectie het gemiddelde en de standaardafwijking afgeleid (zie de titels van de figuren en de stippellijnen). Daarnaast is op basis van de schattingsformule uit [Rijkswaterstaat, 2021], zoals toegelicht in paragraaf 1.3.2, telkens de karakteristieke waarde afgeleid. Deze is in de figuren weergegeven als getal en als gestipte lijn (in het rood voor $\alpha = 0.75$ en in het zwart voor $\alpha = 1.0$).

Het is te zien dat de waarden voor S van siltige en zandige klei redelijk dicht bij elkaar liggen. Humeuze klei heeft een iets grotere schuifsterkte ratio. Voor isotrope kleimonsters bij 2% rek geldt dat de schuifsterkte ratio voor humeuze klei duidelijk lager is, voor zandige klei ongeveer gelijk en voor siltige klei iets hoger. Dit is weergegeven in Bijlage A.4.1.

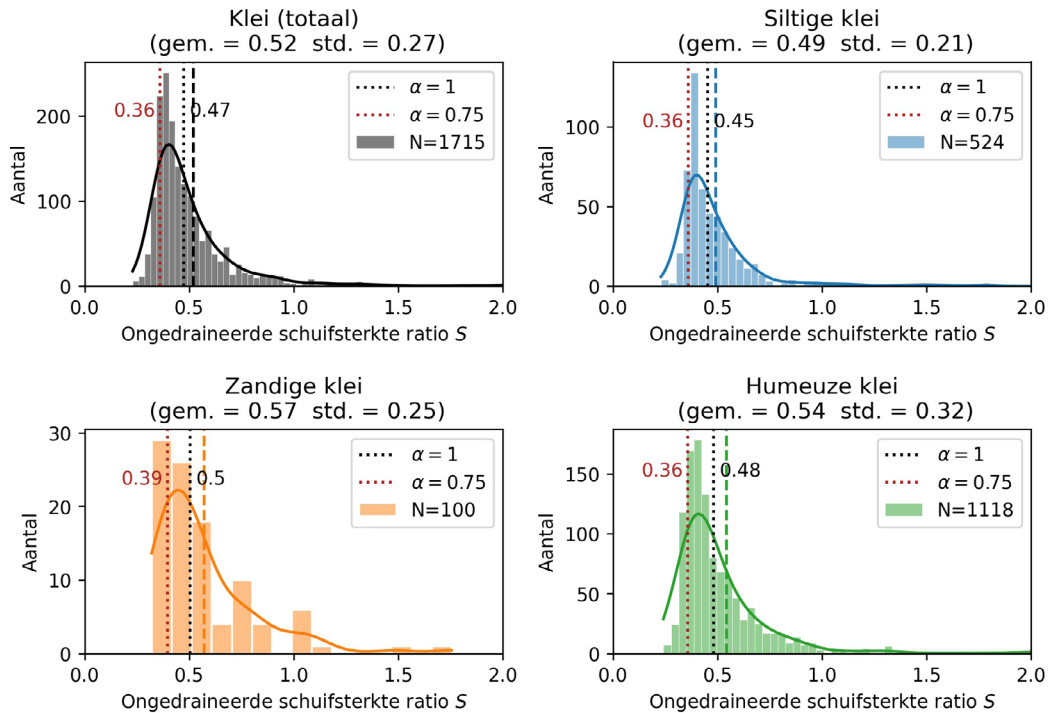
FIGUUR 3.5 BEPALING VAN DE ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S VOOR ANISOTROPE, NORMAALGECONSOLIDEERDE KLEIMONSTERS BIJ 2% REK, PER GROVE KLEIKLASSE, O.B.V. TRIAXIAALPROEVEN



BEPALING VAN S BIJ 5% REK

In Figuur 3.6 zijn de resultaten te zien bij 5% rek. Bij 5% rek zijn de kentallen voor de schuifsterkte ratio S groter dan bij 2% rek. Daarnaast is het verschil tussen siltige en zandige klei significant groter worden, ten opzichte van 2% rek.

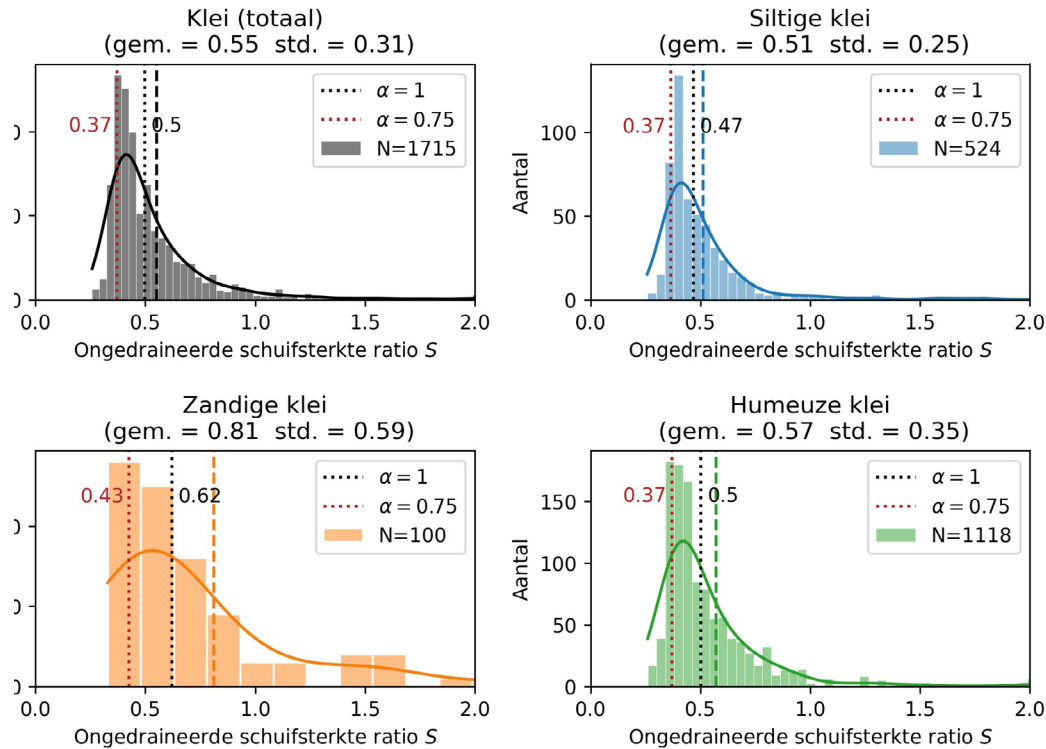
FIGUUR 3.6 BEPALING VAN DE ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S VOOR ANISOTROPE, NORMAALGECONSOLIDEERDE KLEIMONSTERS BIJ 5% REK, PER GROVE KLEIKLASSE, O.B.V. TRIAXIAALPROEVEN



BEPALING S BIJ PIEKSTERKTE

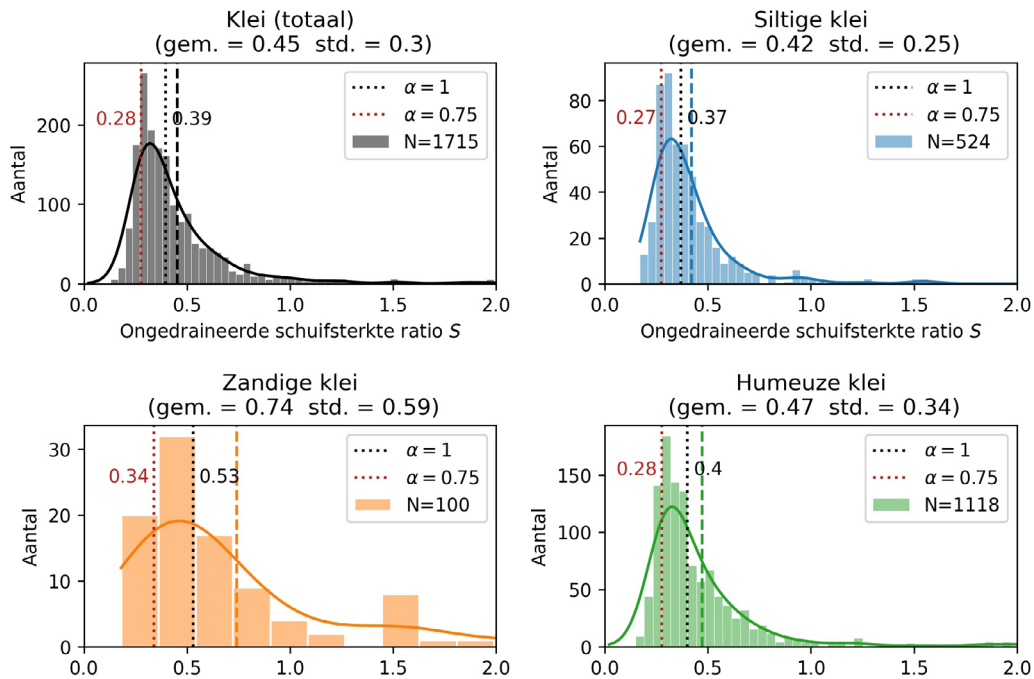
De histogrammen van de schuifsterkte ratio S voor de grove klei categorieën bij de pieksterkte zijn weergegeven in Figuur 3.7. De waarden zijn voor siltige en humeuze klei iets hoger dan bij 5% rek en voor zandige klei zijn ze duidelijk hoger.

FIGUUR 3.7 BEPALING VAN DE ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S VOOR ANISOTROPE, NORMAALGECONSOLIDEERDE KLEIMONSTERS BIJ DE PIEKSTERKTE, PER GROVE KLEIKLASSE, O.B.V. ONGEDRAINEERDE TRIAXIAALPROEVEN

**BEPALING S BIJ EINDREK**

Voor de eindrek zijn de resultaten weergegeven in Figuur 3.8. De kentallen voor S zijn bij de eindrek lager dan bij de andere rekniveaus. Wederom heeft zandige klei een duidelijk hogere waarde voor S dan andere kleisoorten. Voor isotrope kleimonsters resulteert de analyse in hogere waarden voor S en zijn de verschillen iets groter. Dit is weergegeven in Bijlage A.4.1.

FIGUUR 3.8 BEPALING VAN DE ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S VOOR ANISOTROPE, NORMAAL GECONSOLIDEERDE KLEIMONSTERS BIJ DE EINDREK, PER GROVE KLEIKLASSE, O.B.V. ONGEDRAINEERDE TRIAXIAALPROEVEN



3.1.4 EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (CSSM)

De bepaling van de effectieve hoek van inwendige wrijving is gedaan op basis van triaxiaalproeven met de werkwijze zoals toegelicht in paragraaf 1.3.2. Voor de bepaling is wederom gebruik gemaakt van proefresultaten die voldoen aan de criteria zoals opgesomd in de vorige paragraaf.

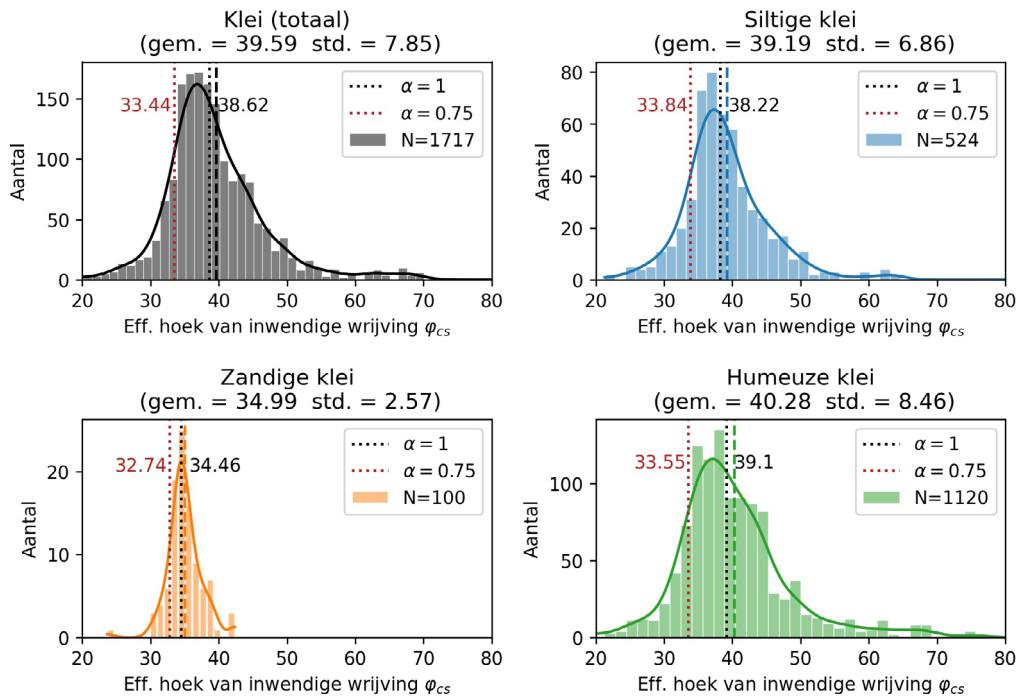
De bepaling is gedaan voor anisotrope, normaal geconsolideerde proeven bij de eindrek. De bepaling van de effectieve hoek van inwendige wrijving voor isotrope monsters is weergegeven in Bijlage A.5 en de resulterende waarden voor de fijnere kleiklassen zijn direct gepresenteerd in Tabel 5.5 in paragraaf 5.1.

BEPALING ϕ'_{cs} BIJ EINDREK

In Figuur 3.9 zijn de resultaten weergegeven voor de drie 'groe' klei categorieën, voor anisotrope, normaal geconsolideerde kleimonsters, bij de eindrek. De gemiddelde waarden zijn weergegeven met een stippellijn en als tekst in de titel, samen met de standaarddeviatie. De karakteristieke waarden, berekend met de formules uit paragraaf 1.3.2, staan in de figuren (met een gestipte lijn, waarbij de karakteristieke waarde met $\alpha = 0,75$ is weergegeven in het rood en met $\alpha = 1,0$ in het zwart).

Zandige klei heeft een duidelijk lagere hoek van inwendige wrijving dan andere kleisoorten. Figuur 6.8 in de Bijlage geeft de resultaten voor isotrope kleimonsters. Voor isotrope kleimonsters is de hoek van inwendige wrijving bij de eindrek groter dan voor anisotrope. Humeuze klei geeft de laagste waarde in dat geval, maar de verschillen zijn relatief klein.

FIGUUR 3.9 EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (CSSM) VOOR NORMAAL GECONSOLIDEERDE, ANISOTROPE KLEIMONSTERS BIJ DE EINDREK, BEPAALD O.B.V. ONGEDRAINEERDE TRIAXIAALPROEVEN, PER KLEISOORT



3.1.5 EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING EN COHESIE (MOHR-COULOMB)

De bepaling van de effectieve hoek van inwendige wrijving en van de cohesie is gedaan op basis van de methode zoals omschreven in paragraaf 1.3.2. Hierbij is gebruik gemaakt van triaxiaalproeven (per rekniveau) die voldoen aan de eerdergenoemde criteria.

Als voorbeeld zijn in onderstaande sub paragrafen de resultaten voor de drie grove kleisoorten gepresenteerd, voor isotrope, normaal geconsolideerde kleimonsters bij 2% rek. Telkens zijn het gemiddelde (verwachtingswaarde) en de standaarddeviatie van de steekproef en de karakteristieke waarde van de populatie afgeleid. De karakteristieke waarden zijn afgeleid voor zowel $\alpha = 0,75$ als $\alpha = 1,0$. Een overzicht van de resulterende kentallen voor fijnere kleiklassen bij 2 en 5% rek zijn weergegeven in Tabel 5.3 en Tabel 5.4 van Hoofdstuk 0. De eindrek is niet beschouwd, omdat de cohesie in dat geval nul is en gebruik kan worden gemaakt van de critical state hoek van inwendige wrijving (zie de vorige paragraaf).

C EN φ BIJ 2% REK

In Figuur 3.10 t/m Figuur 3.12 zijn de uiteindelijke fits weergegeven waarmee de cohesie en hoek van inwendige wrijving zijn bepaald voor siltige, zandige en humeuze klei bij 2% rek. Voor de karakteristieke waarden zijn spanningsniveaus van ca. 30 tot 40 kPa beschouwd en zowel $\alpha = 0,75$ als $\alpha = 1,0$ toegepast. Dit resulteert in de waarden Tabel 3.1 en Tabel 3.2.

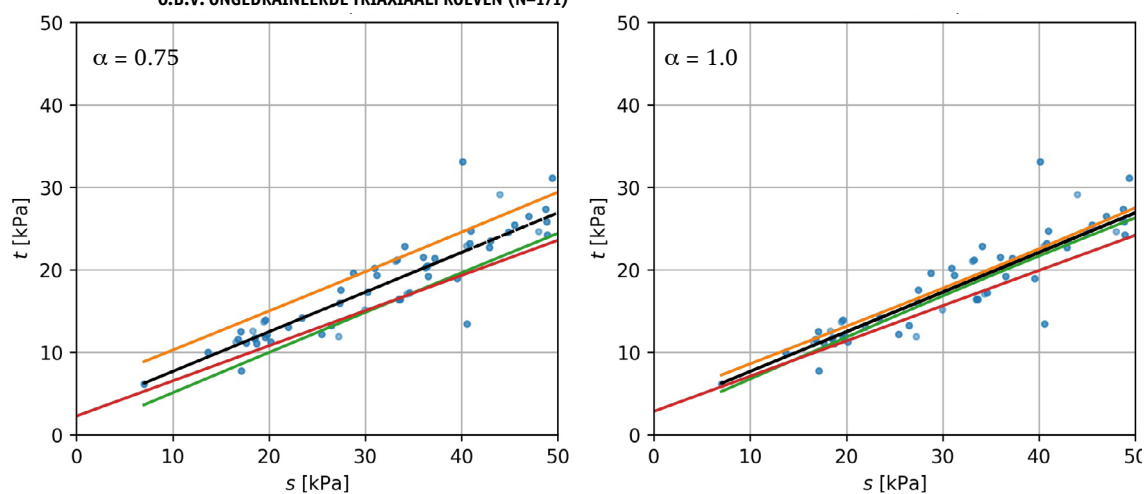
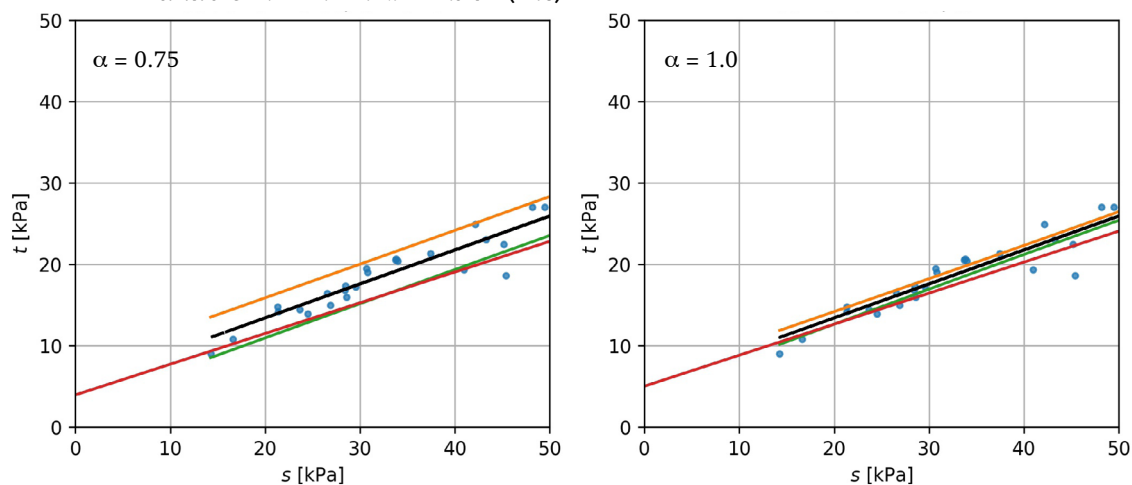
In het geval van sterk zandige klei (bij 2 en 5% rek), zwak humeuze en matig humeuze klei (bij 5% rek) resulteert de berekening in negatieve waarden voor de karakteristieke waarde van de cohesie. In dat geval is de karakteristieke waarde van de cohesie (a_1) op nul gezet en is de parameter a_2 zodanig aangepast dat de fysisch realiseerbare ondergrens de 5% ondergrens raakt. Dit is als voorbeeld weergegeven voor sterk zandige klei bij 2% rek in Figuur 3.13.

TABEL 3.1 RESULTERENDE WAARDEN VOOR DE COHESIE BIJ 2% REK VOOR ISOTROPE KLEIMONSTERS

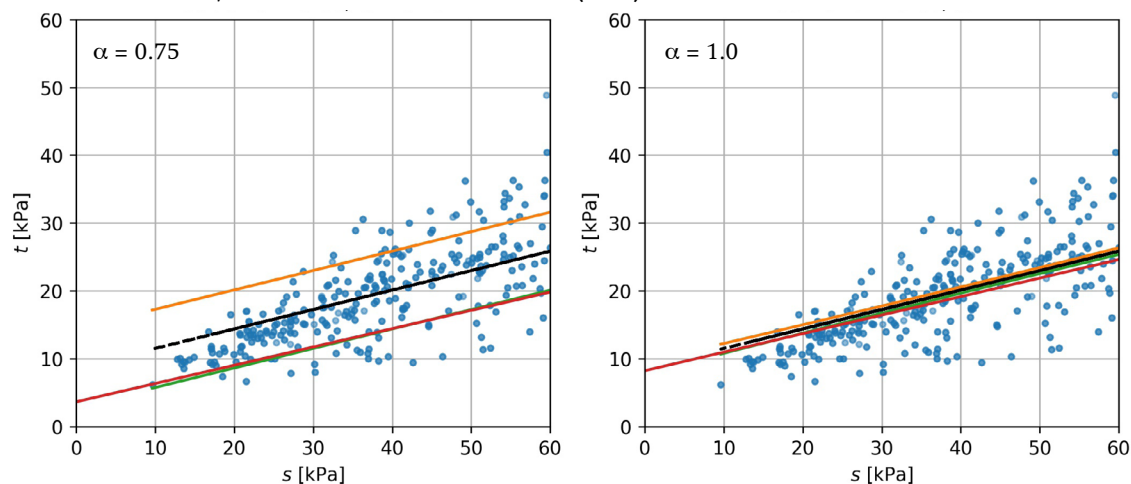
Grondsoort	Verw. waarde	Std.	Kar. waarde ($\alpha = 0,75$)	Kar. waarde ($\alpha = 1,0$)
Siltige klei	4.88	0.53	4.06	4.84
Zandige klei	5.04	0.66	3.93	5.00
Humeuze klei	8.65	0.51	3.64	8.23

TABEL 3.2 RESULTERENDE WAARDEN VOOR DE HOEK VAN INW. WRIJVING BIJ 2% REK VOOR ISOTROPE KLEIMONSTERS

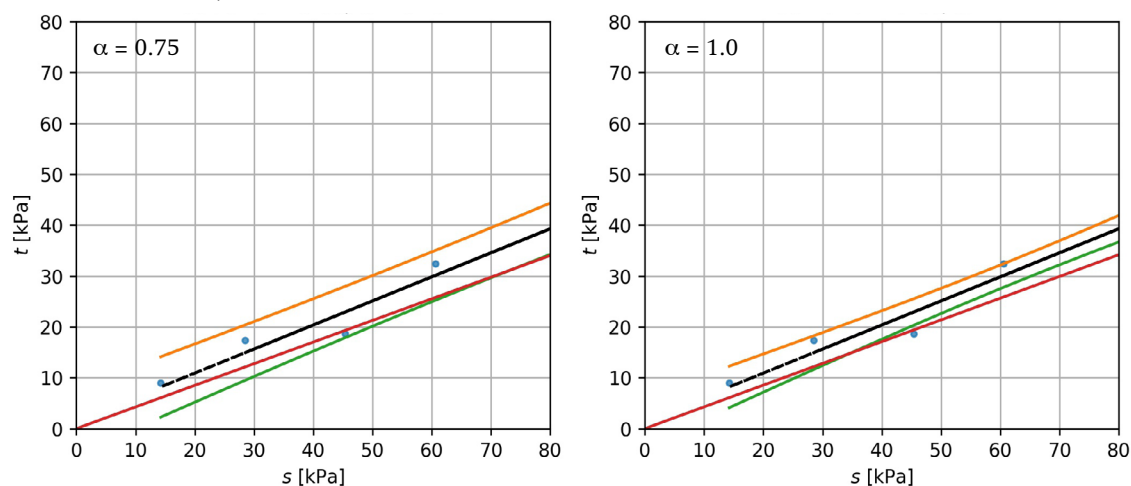
Grondsoort	Verw. waarde	Std.	Kar. waarde ($\alpha = 0,75$)	Kar. waarde ($\alpha = 1,0$)
Siltige klei	25.67	1.07	25.47	25.59
Zandige klei	22.65	0.68	22.33	22.61
Humeuze klei	16.00	0.52	15.66	15.90

FIGUUR 3.10 HULPGRAFIEK VOOR BEPALING VAN C EN ϕ VOOR SILTIGE, ISOTROPE, NORMAAL GECONSOLIDEERDE KLEIMONSTERS BIJ 2% REK, O.B.V. ONGEDRAINEERDE TRIAXIAALPROEVEN (N=171)FIGUUR 3.11 HULPGRAFIEK VOOR BEPALING VAN C EN ϕ VOOR ZANDIGE, ISOTROPE, NORMAAL GECONSOLIDEERDE KLEIMONSTERS BIJ 2% REK, O.B.V. ONGEDRAINEERDE TRIAXIAALPROEVEN (N=78)

FIGUUR 3.12 HULPGRAFIEK VOOR BEPALING VAN C EN ϕ VOOR HUMEUZE, ISOTROPE, NORMAAL GECONSOLIDEERDE KLEIMONSTERS BIJ 2% REK, O.B.V. ONGEDRAINEERDE TRIAXIAALPROEVEN (N=655)



FIGUUR 3.13 HULPGRAFIEK VOOR BEPALING VAN C EN ϕ VOOR STERK ZANDIGE, ISOTROPE NORMAAL GECONSOLIDEERDE KLEIMONSTERS BIJ 2% REK, MET C=0 EN DE FYSISCH REALISEERBARE ONDERGRENEN DE 5% ONDERGRENEN RAAKT



3.2 VEEN

De bepaling van de kentallen voor veen is gedaan op basis van DSS proeven (per rekniveau) die voldoen aan de volgende criteria:

- De grondclassificatie volgens NEN5104 valt in de betreffende veen categorie.
- De betreffende spanningen (s,t) zijn niet nul;
- Het veenmonster is normaal geconsolideerd (OCR = 1);
- Het natte volumegewicht van het veenmonster valt binnen het 90% interval, bepaald op basis van de natte volumieke gewichten uit de classificatieproef.

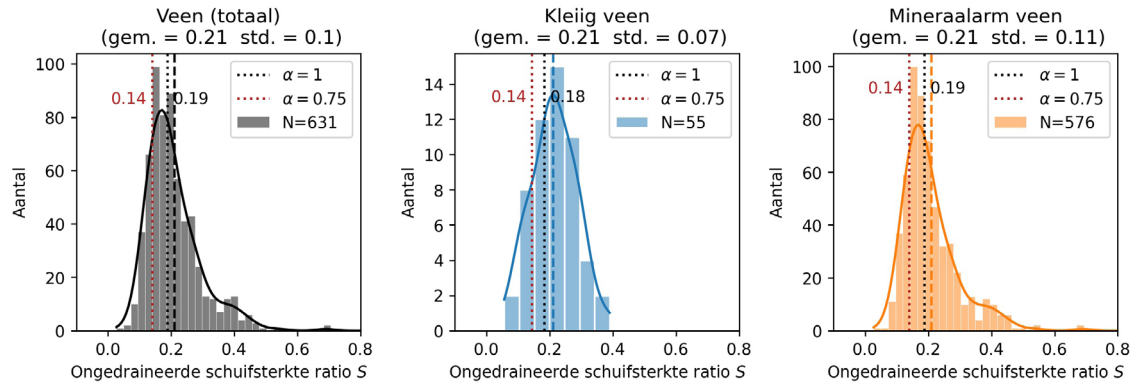
Telkens zijn weer eerst de drie 'grote' veen categorieën bekeken per relevant rekniveau (2%, 5%, piek en eind). Er is niet verder verfijnd, omdat op basis van bovenstaande selectie niet voldoende kleiige veenmonsters over zijn om verder te verfijnen. Voor mineraalarm veen zijn wel veel monsters geselecteerd, maar daar schrijft de NEN5104 geen verfijnde categorieën voor.

3.2.1 ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S (CSSM)

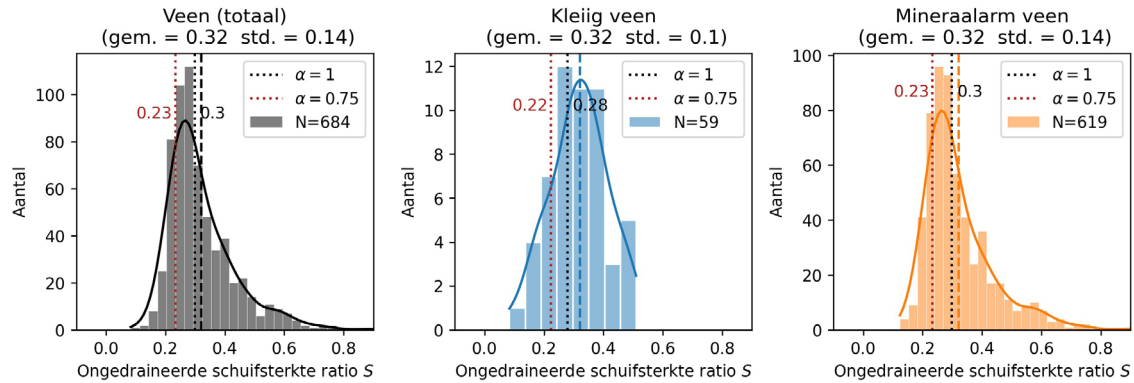
De schuifsterkte ratio S voor veen is bepaald door de schuifspanning t bij het betreffende rekniveau te delen door de effectieve verticale spanning bij de maximale consolidatie-spanning tijdens consolideren. Dit is gedaan op basis van de selectie zoals omschreven aan het begin van dit hoofdstuk.

De resulterende verdelingen zijn weergegeven in Figuur 3.14 t/m Figuur 3.17. De gestipte lijnen geven de karakteristieke waarden weer, waarbij de rode lijn de karakteristieke waarde met $\alpha = 0,75$ weergeeft en de zwarte met $\alpha = 1,0$. Het is te zien dat S toeneemt met toenemende rek. De verschillen tussen kleilig en mineraalarm veen zijn erg klein.

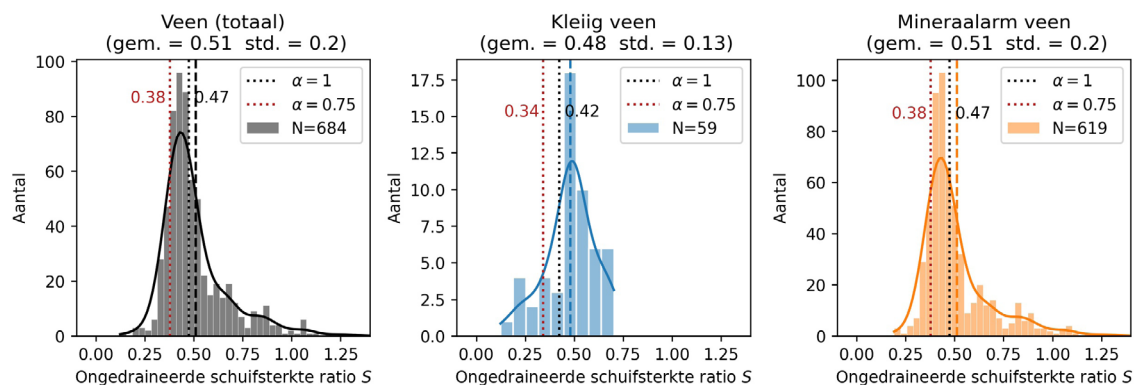
FIGUUR 3.14 BEPALING VAN DE ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S VOOR NORMAALGECONSOLIDEERDE VEENMONSTERS BIJ 2% REK, PER VEENKLASSE O.B.V. DSS PROEVEN



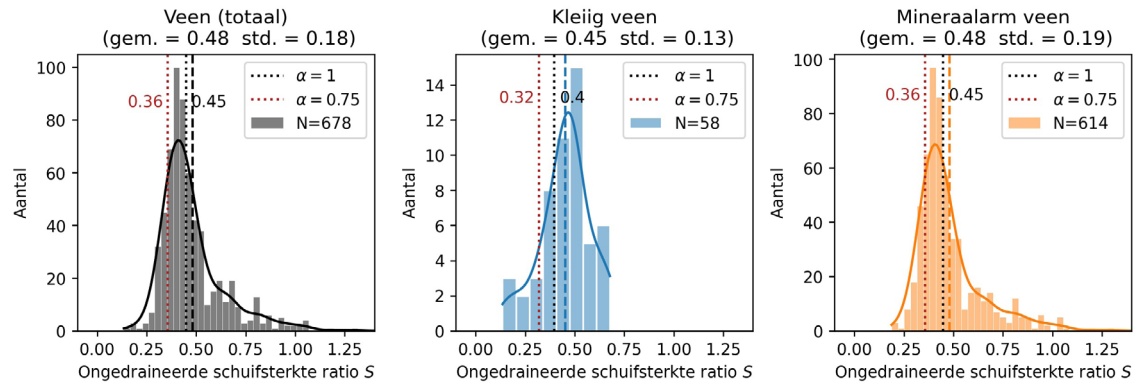
FIGUUR 3.15 BEPALING VAN DE ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S VOOR NORMAALGECONSOLIDEERDE VEENMONSTERS BIJ 5% REK, PER VEENKLASSE O.B.V. DSS PROEVEN



FIGUUR 3.16 BEPALING VAN DE ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S VOOR NORMAAL GECONSOLIDEERDE VEENMONSTERS BIJ PIEKSTERKTE, PER VEENKLASSE O.B.V. DSS PROEVEN



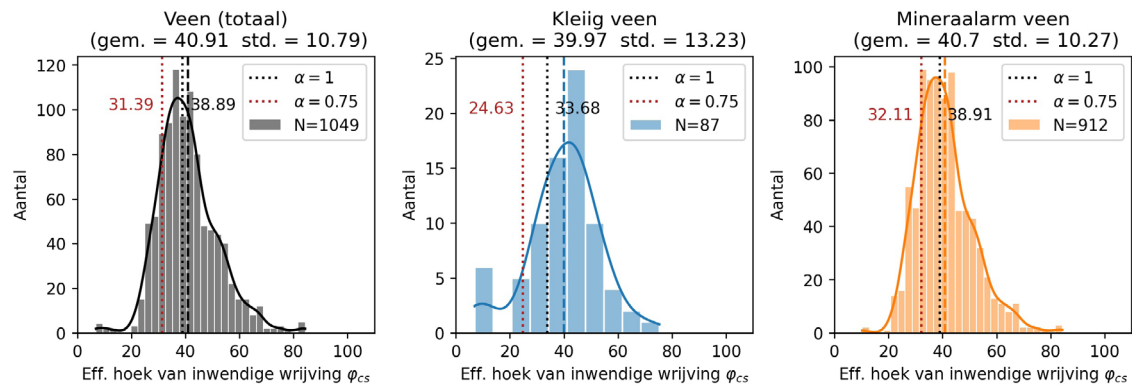
FIGUUR 3.17 BEPALING VAN DE ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S VOOR NORMAALGECONSOLIDEERDE VEENMONSTERS BIJ DE EINDREK, PER VEENKLASSE O.B.V. DSS PROEVEN



3.2.2 EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (CSSM)

Voor de bepaling van de effectieve hoek van inwendige wrijving is dezelfde aanpak gehanteerd als omschreven in paragraaf 1.3.2. Er is voor DSS proeven niet geselecteerd op consolidatiewijze (isotroop vs. anisotroop), maar wel op normaal geconsolideerde proeven. In Figuur 3.18 zijn de resulterende verdelingen weergegeven per veensoort, bij de eindrek. De gestipte zwarte lijn geeft de karakteristieke waarde met weer (lokale proevenverzameling) en de rode lijn met . Het is te zien dat de verschillen tussen de twee veensoorten relatief klein zijn.

FIGUUR 3.18 EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (CSSM) VOOR NORMAAL GECONSOLIDEERDE VEENMONSTERS BIJ DE EINDREK, BEPAALD O.B.V. DSS PROEVEN, PER VEENSOORT



3.2.3 EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING EN COHESIE (MOHR-COULOMB)

Voor het afleiden van de schuifsterkte parameters voor gedraineerde stabiliteitsanalyses – cohesie c' en hoek van inwendige wrijving ϕ' – op basis van proevenverzamelingen is de spreadsheet van Deltares (voor triaxiaalproeven) vertaald naar een versie voor DSS proeven [Waterschap Rivierenland, 2022]. Voor de bepaling is gebruik gemaakt van dezelfde dataselectie als beschreven aan het begin van deze paragraaf.

Als voorbeeld zijn in onderstaande sub paragraaf de resultaten voor de twee veensoorten gepresenteerd, voor normaalgeconsolideerde veenmonsters bij 2% rek, voor een spreidingsreductiefactor met $\alpha = 0,75$ en 1,0.

C EN ϕ BIJ 2% REK

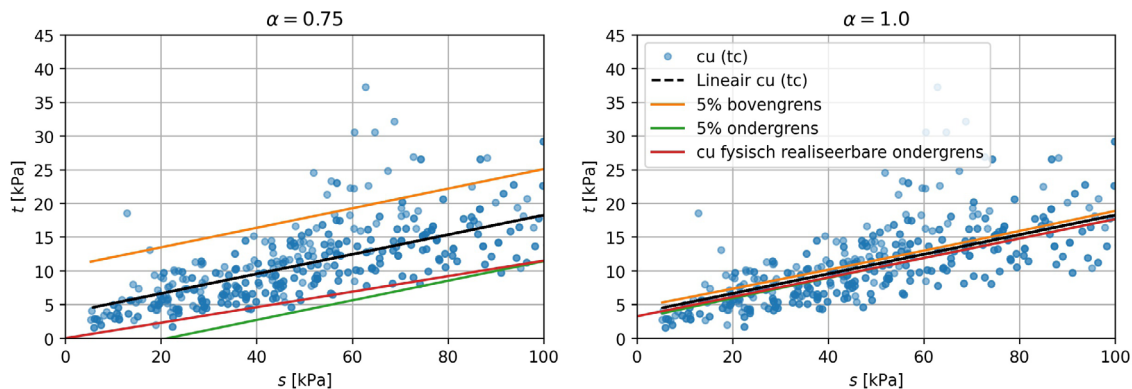
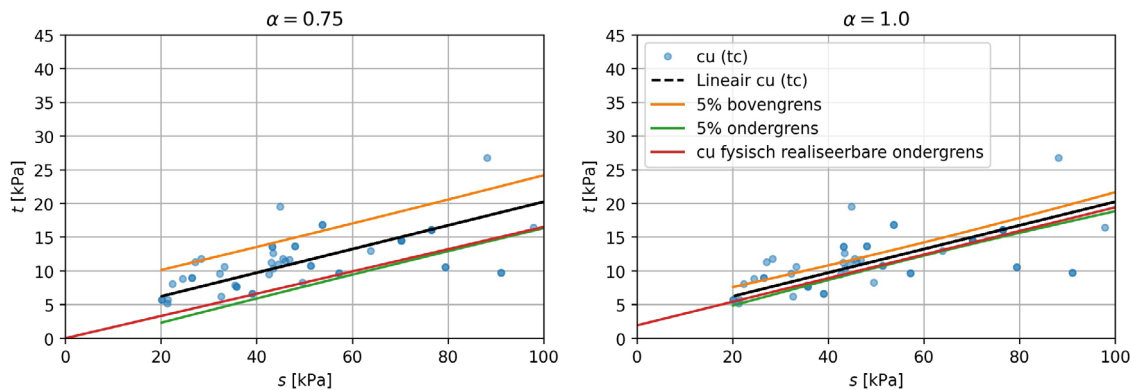
In Figuur 3.19 t/m Figuur 3.21 zijn de uiteindelijke fits weergegeven waarmee de cohesie en hoek van inwendige wrijving zijn bepaald voor veen (totaal), kleiig veen en mineraalarm veen bij 2% rek. Dit resulteert in de waarden van Tabel 3.3 en Tabel 3.4. De karakteristieke waarden zijn wederom de 5% ondergrens van het gemiddelde. Ook bij veen is te zien dat de berekeningen van de standaardafwijking resulteren in negatieve waarden.

TABEL 3.3 RESULTERENDE WAARDEN VOOR DE COHESIE BIJ 2% REK, VOOR DE TWEE VEENSOORTEN

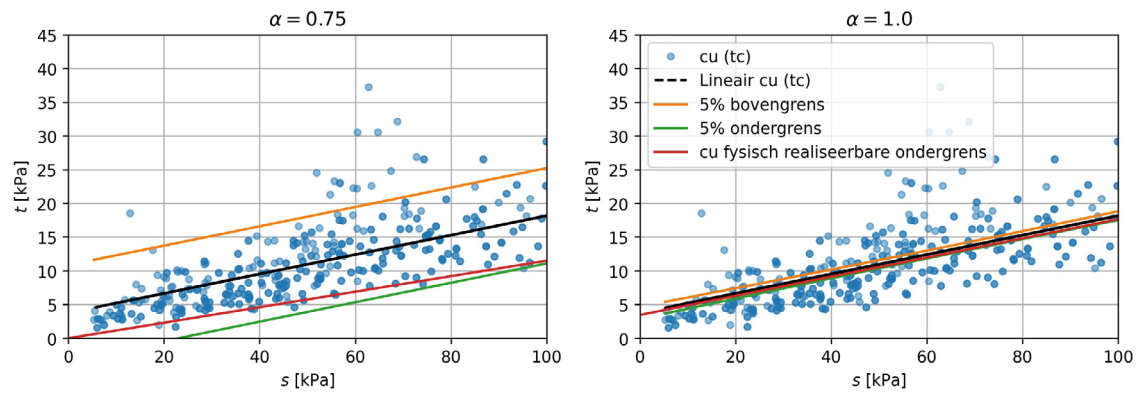
Grondsoort	Verw. waarde	Std.	Kar. waarde ($\alpha = 0,75$)	Kar. waarde ($\alpha = 1,0$)
Veen (totaal)	3.73	0.51	0.0	3.25
Kleiig veen	2.70	1.04	0.0	1.90
Mineraalarm veen	3.77	0.55	0.0	3.25

TABEL 3.4 RESULTERENDE WAARDEN VOOR DE HOEK VAN INW. WRIJVING BIJ 2% REK, VOOR DE TWEE VEENSOORTEN

Grondsoort	Verw. waarde	Std.	Kar. waarde ($\alpha = 0,75$)	Kar. waarde ($\alpha = 1,0$)
Veen (totaal)	8.26	0.33	6.56	8.19
Kleiig veen	9.95	0.84	9.37	9.93
Mineraalarm veen	8.19	0.35	6.56	8.08

FIGUUR 3.19 HULPGRAFIEK VOOR BEPALING VAN C EN ϕ VOOR VEEN TOTAAL (NORMAAL GECONSOLIDEERDE VEENMONSTERS) BIJ 2% REK, O.B.V. DSS PROEVEN**FIGUUR 3.20 HULPGRAFIEK VOOR BEPALING VAN C EN ϕ VOOR KLEIIG VEEN (NORMAAL GECONSOLIDEERDE VEENMONSTERS) BIJ 2% REK, O.B.V. DSS PROEVEN**

FIGUUR 3.21 HULPGRAFIEK VOOR BEPALING VAN c EN ϕ VOOR MINERAALARM VEEN (NORMAAL GECONSOLIDEERDE VEENMONSTERS) BIJ 2% REK, O.B.V. DSS PROEVEN



4

LANDELIJKE SPREIDING

In Hoofdstuk 3 zijn kentallen voor sterkteparameters afgeleid voor klei en veen. Dit is gedaan op basis van een landelijke database van grondproeven. Om inzicht te krijgen in de variaties van de betreffende parameters in Nederland, is in dit hoofdstuk een nadere analyse gepresenteerd. Hiervoor zijn de proeven geclusterd op basis van locatie en zijn voor ieder cluster het gemiddelde en de standaardafwijking van de betreffende parameter bepaald. Dit sluit aan bij een eerdere analyse die voor RWS in 2016 is gedaan [Tigchelaar en Daggenvoorde, 2017].

In de onderstaande analyse zijn alleen het natte volumieke gewicht en de schuifsterkte ratio uitgewerkt, omdat deze twee parameters redelijk eenvoudig af te leiden zijn. Dit geeft een eerste beeld van de landelijke spreiding. De resultaten van de analyses zijn in paragraaf 4.1.1 gepresenteerd voor klei en in paragraaf 4.1.2 voor veen.

De oorzaken voor de landelijke verschillen zijn binnen dit project niet verder onderzocht.

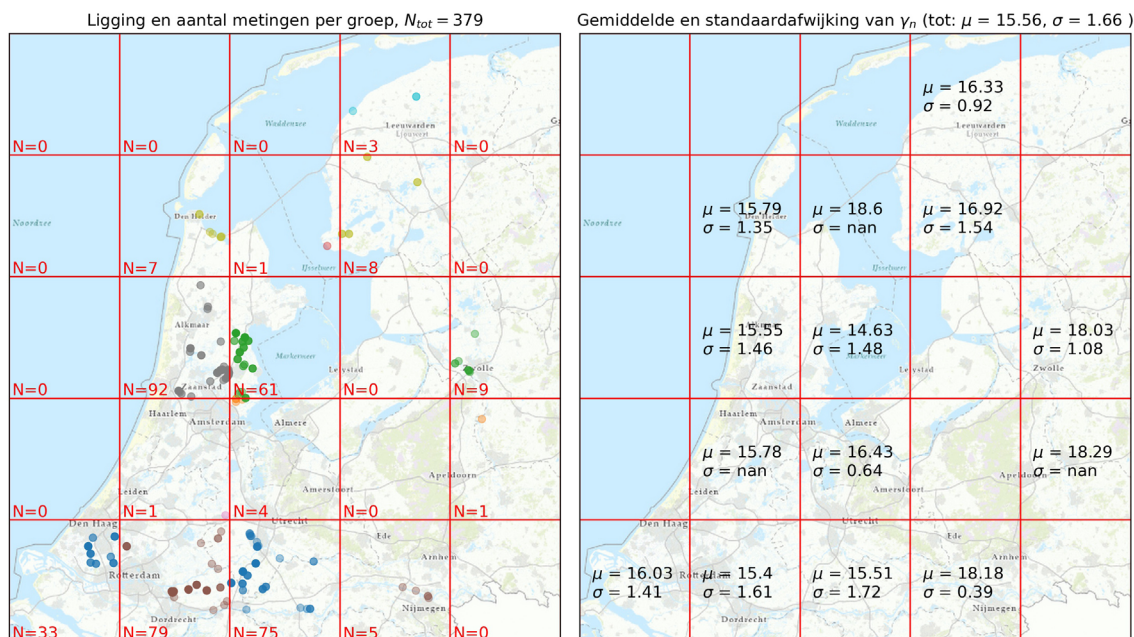
4.1 KLEI

VOLUMIEK GEWICHT (NAT)

De data is, net als in het voorgaande hoofdstuk, gefilterd op basis van het 90% interval van het volumieke gewicht en op basis van het watergehalte (bij siltige en zandige klei). In Figuur 4.1 is het resultaat van de analyse gepresenteerd voor het natte volumieke gewicht, voor sterk siltige klei. Er is gekozen voor het presenteren van deze kleisoort, omdat er voor deze soort redelijk goed verspreid voldoende data beschikbaar is. De rode vierkanten geven de grenzen van de (arbitrair gekozen) clusters weer. In de linker kaart zijn de clusters in verschillende kleuren weergegeven, samen met het aantal proeven per cluster. In het rechter figuur zijn de gemiddelde waarde en standaardafwijking van het natte volumieke gewicht van het betreffende cluster weergegeven.

Het is te zien dat de spreiding over het algemeen wel mee valt. Het volumieke gewicht van sterk siltige klei in het oosten is iets hoger dan in het westen. Echter geldt dat er hier maar zeer weinig proeven beschikbaar zijn, waardoor de resultaten minder betrouwbaar zijn. Opvallend is daarnaast het gemiddelde van het meest centrale cluster, dit is significant lager dan in de rest van Nederland.

FIGUUR 4.1 LANDELIJKE SPREIDING VAN HET VOLUMIEKE GEWICHT (NAT) VAN STERK SILTIGE KLEI OP BASIS VAN CLASSIFICATIEPROEVEN. NAN STAAT VOOR 'NOT A NUMBER' EN GEEFT AAN DAT DE STANDAARD DEVIATIE NIET KAN WORDEN AFGELEID (BIJ N=1)

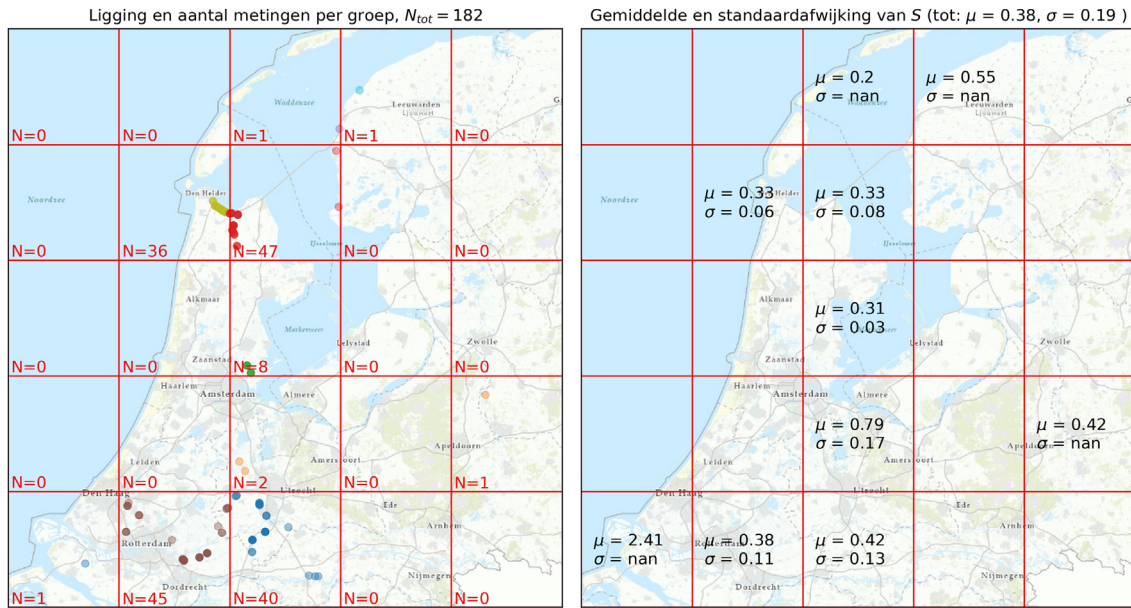


De resultaten voor de grove categorieën van siltige, zandige en humeuze klei zijn weergegeven in Bijlage B.1. Deze resultaten geven een vergelijkbaar beeld als de analyse in Figuur 4.1 voor alle kleimonsters bij elkaar.

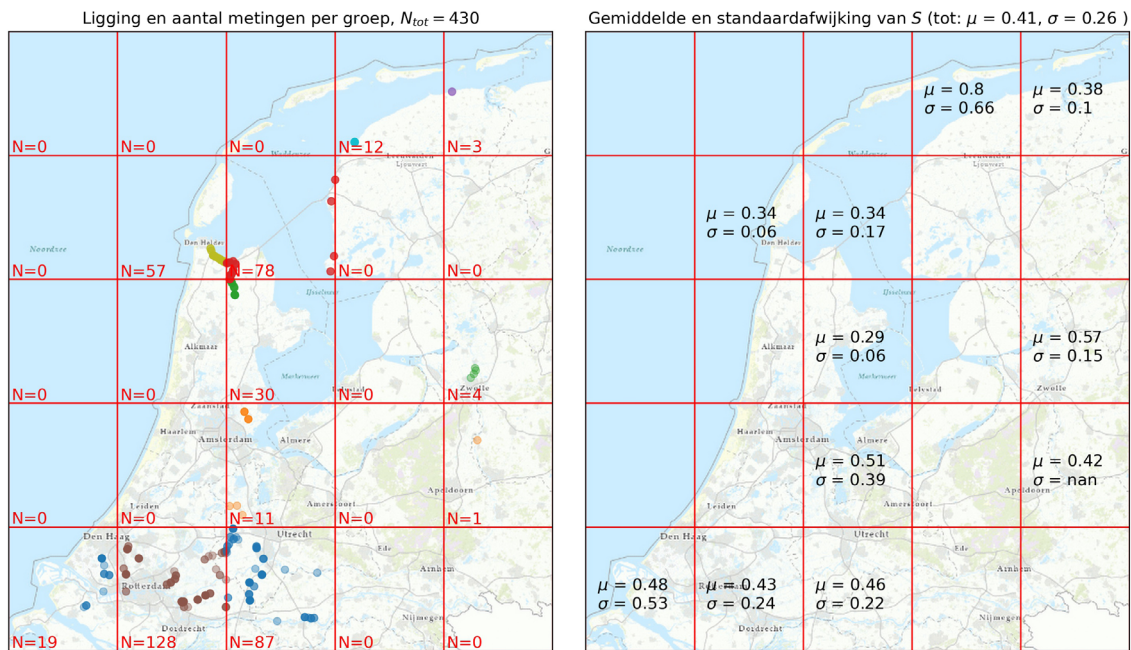
SCHUIFSTERKTE RATIO S

Voor het analyseren van de landelijke spreiding van de sterkteparameter S is gebruik gemaakt van dezelfde datasetselectie als omschreven in paragraaf 3.1.3. Voor anisotrope, normaal geconsolideerde sterk siltige kleimonsters bij de eindrek is de landelijke spreiding weergegeven in Figuur 4.2 en voor siltige klei (totaal) in Figuur 4.3. De resultaten zijn ook gepresenteerd voor siltige klei (totaal), omdat er voor sterk siltige klei maar weinig punten per cluster beschikbaar zijn. Het is te zien dat de landelijke spreiding ook voor S wel meevalt. Opvallend hoog is de gemiddelde schuifsterkte ratio van het cluster bij Zwolle. In sommige vierkanten is het aantal datapunten zeer klein, bijvoorbeeld in het vierkant bij Leiden ($N=3$). Dit resulteert in afwijkende waarden (0,58 en 0,0). Daarnaast valt het hogere gemiddelde en spreiding in de twee clusters ten westen van Rotterdam op.

FIGUUR 4.2 LANDELIJKE SPREIDING VAN DE SCHUIFSTERKTE RATIO VAN STERK SILTIGE KLEI BIJ DE EINDREK OP BASIS VAN TRIAXIAALPROEVEN



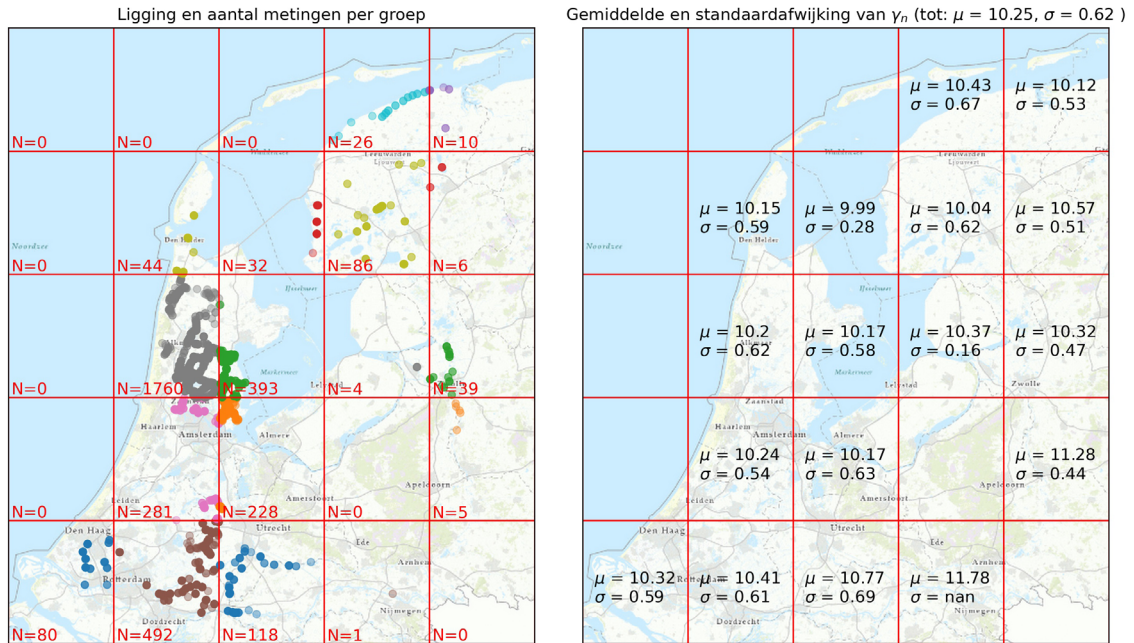
FIGUUR 4.3 LANDELIJKE SPREIDING VAN DE SCHUIFSTERKTE RATIO VAN SILTIGE KLEI BIJ DE EINDREK OP BASIS VAN TRIAXIAALPROEVEN



4.2 VEEN

In Figuur 4.4 is dezelfde soort analyse gepresenteerd voor het natte volumieke gewicht van veen. Het is te zien dat de spreiding kleiner is dan bij klei. Wederom zijn de gemiddelde waarden rondom Nijmegen en Apeldoorn iets hoger, dit was bij klei ook te zien.

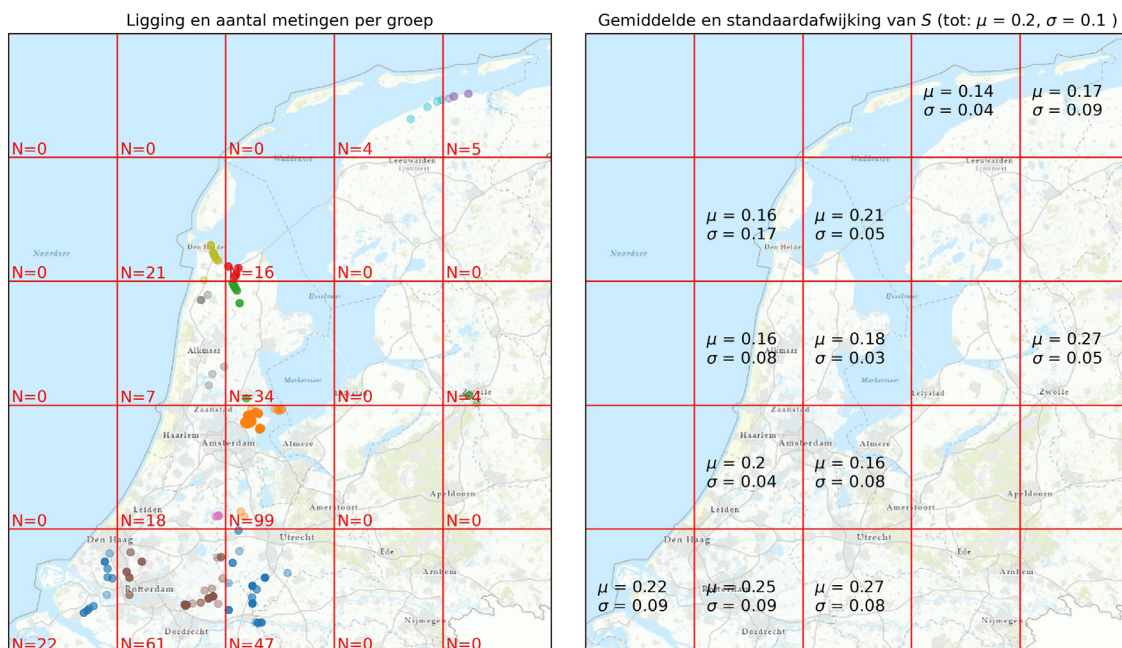
FIGUUR 4.4 LANDELIJKE SPREIDING VAN HET VOLUMIEKE GEWICHT (NAT) VAN VEEN OP BASIS VAN CLASSIFICATIEPROEVEN



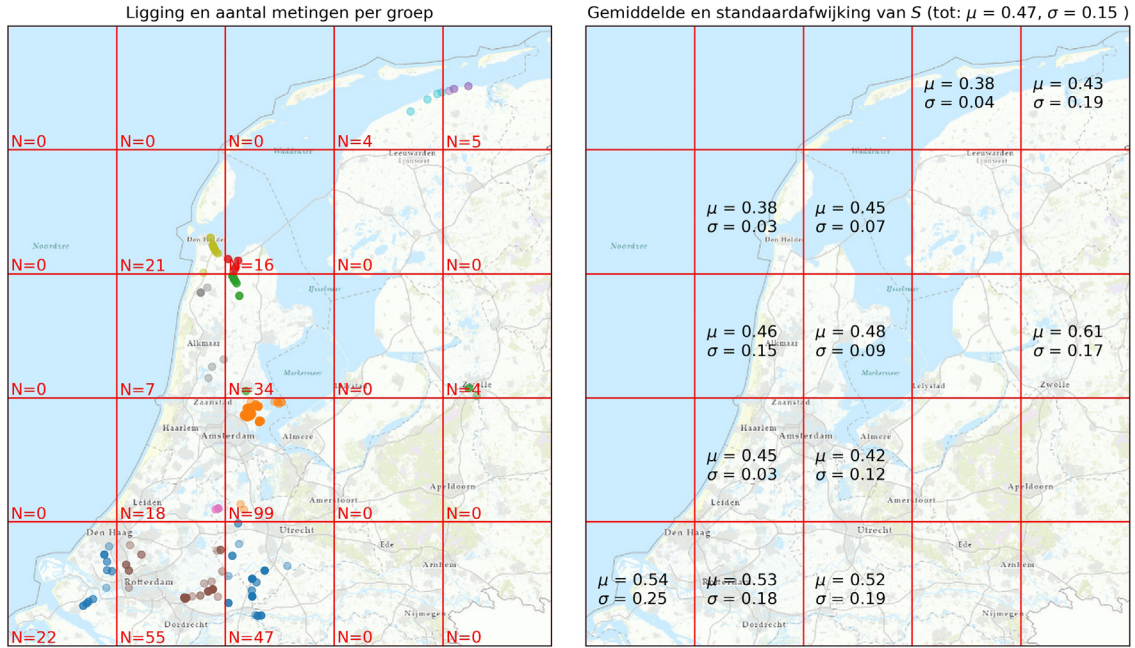
SCHUIFSTERKTE RATIO S

Figuur 4.5 en Figuur 4.6 geven de landelijke spreiding van de schuifsterkte ratio S weer voor veen bij 2% rek en bij de eindrek, respectievelijk. De spreiding valt redelijk mee. Echter is daarnaast te zien dat het aantal proeven per cluster niet zeer groot is. Bij veen valt het hogere gemiddelde en spreiding in de twee clusters ten westen van Rotterdam op.

FIGUUR 4.5 LANDELIJKE SPREIDING VAN DE SCHUIFSTERKTE RATIO VAN VEEN BIJ 2% REK OP BASIS VAN DSS PROEVEN



FIGUUR 4.6 LANDELIJKE SPREIDING VAN DE SCHUIFSTERKTE RATIO VAN VEEN BIJ DE EINDREK OP BASIS VAN DSS PROEVEN



5

CONCLUSIES & AANBEVELINGEN

5.1 CONCLUSIES

Op basis van de uitgevoerde analyses is een parameterset afgeleid voor het volumieke gewicht, de SHANSEP sterkteparameter S , voor de Mohr-Coulomb sterkteparameters c en φ' en voor de critical-state parameter φ_{cs}' . Voor iedere parameter is de verwachtingswaarde (gemiddelde), de karakteristieke waarde en de standaardafwijking bepaald. Voor het volumieke gewicht zijn alleen de verwachtingswaarde en standaardafwijking afgeleid.

De parameters zijn afgeleid op basis van een dataset, bestaande uit proevenverzamelingen van verschillende waterschappen, verspreid over Nederland. Voor het afleiden van de parameterset zijn proeven geselecteerd uit de dataset op basis van data betrouwbaarheid, waarbij de selectiecriteria zijn onderbouwd met verkennende analyses.

VOLUMIEKE GEWICHT

Voor het afleiden van kentallen voor het volumieke gewicht van klei en veen is gebruik gemaakt van een landelijke set aan classificatieproeven. De dataset is een eerste filtering ondergaan om nullen en lege velden eruit te filteren. Vervolgens is op basis van een verkennende analyse naar het watergehalte besloten om monsters met een watergehalte van minder dan 10% en siltige en zandige kleimonsters met een watergehalte van meer dan 150% niet mee te nemen in de bepaling van het natte volumieke gewicht van de betreffende kleiklassen. Dit is gedaan, omdat met zekerheid gesteld kan worden dat monsters met een dergelijk watergehalte geen betrouwbare meting van het natte volumieke gewicht kunnen opleveren.

Er is gekozen voor een verdere verfijning van de kleisoorten naar 'zwak', 'matig' en 'fijn' volgens de NEN5104, omdat is gebleken dat de fijne kleiklassen in veel gevallen relatief grote verschillen in het volumieke gewicht laten zien. Voor veen is deze verfijning alleen gedaan naar zwak kleilig veen en sterk kleilig veen, omdat er niet genoeg data was voor matig kleilig veen en mineraalarm veen niet verder uitgesplitst wordt volgens NEN5104.

De resulterende parameterset voor het natte en droge volumieke gewicht van verschillende klei- en veenklassen is weergegeven in Tabel 5.1. Zandige klei blijkt het zwaarst te zijn en heeft de kleinste spreiding. Voor siltige klei blijkt dat zwak siltige klei duidelijk lichter is dan matig en sterk siltige klei. Bij humeuze klei is sterk humeuze klei ca. $3,5 \text{ kN/m}^3$ lichter dan zwak humeuze klei.

Bij veen zijn de verschillen kleiner. Kleilig veen heeft een nat volumiek gewicht tussen de $10,9$ en $11,4 \text{ kN/m}^3$ waar mineraalarm veen rond de $10,0 \text{ kN/m}^3$ weegt. Veen laat daarnaast weinig spreiding zien.

Voor het droge volumieke gewicht geldt voor zowel klei als veen dat de spreiding groter is dan voor het natte volumieke gewicht. Dit kan, zoals toegelicht in paragraaf 2.1, te maken hebben met inconsistenties in te meetmethode. Echter wordt het droge volumieke gewicht nauwelijks gebruikt in stabiliteitsanalyses van keringen, waardoor de nauwkeurigheid van de afgeleide kentallen minder van belang is dan bij het natte volumieke gewicht.

TABEL 5.1 RESULTERENDE SET VAN VOLUMIEKE GEWICHTEN VOOR KLEI- EN VEEN KLASSEN VOLGENS NEN5104

Grondsoort	Volumieke gewicht (nat) [kN/m ³]		Volumieke gewicht (droog) [kN/m ³]	
	verw. waarde	std.	verw. waarde	std.
Klei (totaal)	15.87	2.04	10.25	3.17
Siltige klei	15.73	1.56	9.75	2.57
Ks1	15.06	1.3	8.93	2.31
Ks2	15.96	1.54	10.18	2.53
Ks3	15.72	1.57	9.56	2.63
Zandige klei	16.55	1.47	11.47	2.46
Kz1	16.18	1.4	10.67	2.6
Kz2	16.57	1.58	11.29	2.56
Kz3	17.64	1.01	12.94	1.56
Humeuze klei	15.95	1.72	10.29	2.72
Kh1	16.84	1.47	11.66	2.33
Kh2	15.19	1.19	9.10	1.88
Kh3	13.34	1.19	6.32	1.75
Veen (totaal)	10.24	0.62	2.34	1.48
Kleiig veen	11.14	0.62	3.53	1.61
vk1	10.89	0.55	3.21	1.43
vk3	11.42	0.62	3.85	1.59
Mineraalarm veen	10.0	0.43	2.00	1.16

SPANNINGSGEDRAG

Voordat de sterkteparameters zijn afgeleid, zijn verkennende analyses uitgevoerd naar het spanningsgedrag van klei bij verschillende rekken, consolidatiegraden en consolidatiewijzen. Hieruit is gebleken dat sterk overgeconsolideerde monsters bij lage rekken (2%) een ander gedrag vertonen dan normaal geconsolideerde monsters. Bij grote rekken (eindrek) is het gedrag van alle monsters vrijwel hetzelfde. Als het spanningsgedrag van normaal geconsolideerde monsters bij verschillende rekken wordt vergeleken, dan blijkt dat het spanningsgedrag redelijk vergelijkbaar is bij 5% rek, pieksterkte en eindrek. Alleen bij 2% rek is de helling van de trendlijn in het s,t-diagram iets flauwer dan bij de andere rekken.

Met betrekking tot de consolidatiewijze resulteert de analyse in dezelfde conclusies. Bij 2% rek is er een duidelijk verschil te zien in het gedrag van isotrope en anisotrope kleimonsters. Bij hogere rekken verdwijnt dit verschil echter en liggen de trendlijnen in het s,t-diagram vrijwel op elkaar.

Voor isotrope monsters geldt daarnaast, net als bij de consolidatiegraad, dat wanneer het spanningsgedrag bij verschillende rekken wordt vergeleken, dan blijken de trendlijnen wederom mooi op elkaar te liggen met uitzondering van de 2% rek. Bij anisotrope monsters geldt echter dat dan zelfs de trendlijn van 2% rek samenvalt met de andere rekniveaus.

De bovenstaande conclusies betekenen in essentie dat het bij grote rekken niet nodig is om de data vooraf te selecteren op consolidatiegraad en -wijze. Voor 2% rek is dit echter wel van belang. Ten behoeve van de consistentie in de werkwijze is daarom besloten om voor alle rekniveaus een selectie te maken op normaal geconsolideerd (OCR=1) en onderscheid te maken tussen isotrope en anisotrope monsters.

ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S

Voor het afleiden van de ongedraineerde schuifsterkte ratio is voor klei gebruik gemaakt van triaxiaalproeven en voor veen van DSS proeven. Er is gebruik gemaakt van de normaal geconsolideerde monsters waarvan het natte volumieke gewicht binnen het 90% interval valt. Daarnaast is onderscheid gemaakt tussen isotrope en anisotrope monsters.

De resulterende kentallen van S zijn weergegeven in Tabel 5.2 voor anisotrope monsters bij verschillende rekniveaus en in de Bijlage in Tabel 6.1 voor isotrope monsters. Het is te zien dat de verschillen in gemiddelde S bij lage rekken tussen de kleiklassen relatief klein zijn. Voor 2% rek varieert het gemiddelde van S tussen 0,43 en 0,50. Voor veen zijn de gemiddelde waarden voor S bij kleine waarden zelfs bijna identiek voor kleilig veen en mineraalarm veen. Bij hoge rekken neemt S toe en worden de verschillen iets groter. Het verrekenen van de invloed van de ruimtelijke spreiding zorgt voor een flinke afname van de karakteristieke waarde.

In algemene zin is het verwerken van een ruimtelijke invloed van parameters binnen grondlagen discutabel voor kentallen voor Nederland. De grondlagen strekken zich niet zo ver uit en feitelijk volgen uit de analyse relaties tussen de grondsoort en de eigenschappen. Het is te verdedigen om voor de kentallen gebruik te maken van klassieke schattingsformules waarbij de 5% ondergrens wordt bepaald. Dit correspondeert met $\alpha=1$ in de gehanteerde formules.

Voor een specifieke situatie zal de ruimtelijke invloed wèl van belang zijn. In dat geval zal α kleiner worden en moeten worden gekozen. Voor een optimaal resultaat kan hierbij een regionaal deel van de data worden gebruikt in combinatie met $\alpha = 0,75$, zoals nu ook gebruikelijk is. Hiermee wordt dan recht gedaan aan regionale gemiddelden en spreiding.

Over het algemeen kan geconcludeerd worden dat voor de sterkteparameters S en een verfijning van veen in kleilig veen en mineraalarm veen niet per se nodig is. Voor klei is dit wel van belang.

TABEL 5.2 RESULTERENDE KENTALLEN VOOR S VOOR (ANISOTROPE) KLEI EN VEEN BIJ VERSCHILLENDE REKNIVEAUS

Grondsoort	Parameter	2%	5%	PIEK	EIND
Klei (totaal)	Gem.	0.48	0.52	0.55	0.45
	Std.	0.22	0.27	0.31	0.3
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.35	0.36	0.37	0.28
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.45	0.47	0.5	0.39
Ks	Gem.	0.46	0.49	0.51	0.42
	Std.	0.16	0.21	0.25	0.25
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.36	0.36	0.37	0.27
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.43	0.45	0.47	0.37
Ks1	Gem.	0.43	0.46	0.5	0.41
	Std.	0.11	0.19	0.3	0.31
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.35	0.34	0.35	0.25
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.4	0.42	0.43	0.33

Grondsoort	Parameter	2%	5%	PIEK	EIND
Ks2	Gem.	0.49	0.52	0.54	0.45
	Std.	0.22	0.26	0.29	0.28
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.35	0.36	0.37	0.28
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.44	0.46	0.48	0.38
Ks3	Gem.	0.44	0.46	0.48	0.38
	Std.	0.09	0.13	0.18	0.19
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.37	0.37	0.37	0.28
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.42	0.43	0.44	0.34
Kz	Gem.	0.47	0.57	0.81	0.74
	Std.	0.13	0.25	0.59	0.59
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.37	0.39	0.43	0.34
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.44	0.5	0.62	0.53
Kz1	Gem.	0.49	0.59	0.79	0.68
	Std.	0.16	0.3	0.54	0.56
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.37	0.38	0.39	0.24
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.43	0.47	0.54	0.38
Kz2	Gem.	0.43	0.49	0.61	0.54
	Std.	0.09	0.16	0.41	0.35
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.36	0.36	0.36	0.3
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.4	0.42	0.47	0.4
Kz3	Gem.	0.46	0.55	0.7	0.65
	Std.	0.13	0.2	0.32	0.34
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.37	0.41	0.48	0.41
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.42	0.49	0.6	0.53
Kh	Gem.	0.5	0.54	0.57	0.47
	Std.	0.26	0.32	0.35	0.34
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.35	0.36	0.37	0.28
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.45	0.48	0.5	0.4
Kh1	Gem.	0.49	0.54	0.58	0.49
	Std.	0.25	0.31	0.34	0.34
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.35	0.36	0.37	0.28
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.45	0.48	0.51	0.41
Kh2	Gem.	0.46	0.48	0.5	0.4
	Std.	0.13	0.16	0.17	0.18
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.36	0.36	0.37	0.27
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.43	0.44	0.46	0.36
Kh3	Gem.	0.5	0.55	0.58	0.46
	Std.	0.21	0.3	0.34	0.33
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.38	0.39	0.4	0.28
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.46	0.49	0.51	0.39
Veen (totaal)	Gem.	0.21	0.32	0.51	0.48
	Std.	0.1	0.14	0.2	0.18
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.14	0.23	0.38	0.36
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.19	0.3	0.47	0.45
Vk	Gem.	0.21	0.32	0.48	0.45
	Std.	0.07	0.1	0.13	0.13
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.14	0.22	0.34	0.32
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.18	0.28	0.42	0.4
Vm	Gem.	0.21	0.32	0.51	0.48
	Std.	0.11	0.14	0.2	0.19
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.14	0.23	0.38	0.36
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.19	0.3	0.47	0.45

COHESIE EN HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (MOHR-COULOMB)

Voor de lagere rekken zijn de hoek van inwendige wrijving en de cohesie afgeleid op basis van triaxiaalproeven voor klei en DSS proeven voor veen. Dezelfde proevenselectie als voor de andere sterkteparameters is gehanteerd. Hierbij is wederom onderscheid gemaakt tussen isotrope en anisotrope kleimonsters. Voor het afleiden van c en φ is gebruik gemaakt van spreadsheets van Deltares, die rekening houden met de onderlinge correlatie en gebruik maken van regressieanalyses. Op de statistische formules voor de 5% onder- en bovengrenzen is een verbetering uitgevoerd, zoals toegelicht in Bijlage C en [Calle, E. en Van Duinen, A., 2015].

De resultaten voor de rekniveaus 2% en 5% voor verschillende klei- en veenklassen zijn weergegeven in Tabel 5.3 en Tabel 5.4, voor (isotrope) normaal geconsolideerde monsters, voor $\alpha = 0,75$ en $\alpha = 1,00$. De karakteristieke waarden zijn afgeleid voor een spanningsniveau van ca. 30 tot 40 kPa. De bijbehorende figuren zijn weergegeven Bijlage A.6. In sommige gevallen is sprake van onvoldoende datapunten om een betrouwbare schatting te geven, dit is in de tabellen weergegeven met '-'.

Op basis van de resultaten kan worden geconcludeerd dat de verschillen tussen de twee rekniveaus relatief groot zijn. Een hoger rekniveau resulteert in een grotere hoek van inwendige wrijving. Bij de cohesie geldt dat een hoger rekniveau over het algemeen resulteert in een lagere cohesie. De hoek van inwendige wrijving is juist bij siltige en zandige klei duidelijker groter dan bij humeuze klei. Het blijkt dat humeuze klei over het algemeen een grotere cohesie laat zien dan siltige of zandige klei. Ook de verschillen tussen de fijnere kleiklassen zijn relatief groot. De cohesie van veen is over het algemeen lager dan bij klei, evenals de hoek van inwendige wrijving. Bij veen zijn de verschillen kleiner. De karakteristieke waarden bij een α van 1,0 liggen relatief dicht bij de verwachtingswaarden, bij $\alpha = 0,75$ ligt de karakteristieke waarde lager. In sommige gevallen gaf de spreadsheet karakteristieke waarden van φ' die hoger lagen dan de verwachtingswaarde. In dat geval zijn a_1 en a_1 dusdanig aangepast dat het resulteert in lagere karakteristieke waarden en de fysisch realiseerbare ondergrens nog steeds (redelijk) goed overeenkomt met de 5% ondergrens voor het spanningsniveau van interesse.

TABEL 5.3

RESULTERENDE KENTALLEN VOOR DE COHESIE VOOR (ISOTROPE) KLEI EN VEEN BIJ 2% EN 5% REK

Grondsoort	Rekniveau	Verw. waarde	Std.	Kar. waarde, ($\alpha = 0.75$)	Kar. waarde, ($\alpha = 1.0$)
Klei (totaal)	2%	7.16	0.42	2.64	6.99
	5%	4.81	0.39	1.81	4.77
Siltige klei	2%	4.88	0.53	4.06	4.84
	5%	2.65	0.50	2.60	2.61
Ks1	2%	-*	-*	-*	-*
	5%	-*	-*	-*	-*
Ks2	2%	5.50	0.77	4.17	5.39
	5%	4.07	0.45	3.98	4.12
Ks3	2%	2.63	0.62	2.61	2.62
	5%	3.73	0.41	3.60	3.73
Zandige klei	2%	5.04	0.66	3.93	5.00
	5%	3.73	0.64	3.36	3.71
Kz1	2%	5.47	0.53	4.87	5.31
	5%	3.67	0.57	3.56	3.60
Kz2	2%	4.02	0.77	3.96	4.02
	5%	6.30	0.87	6.24	6.27

Kz3	2%	1.45	2.76	0.0	0.0
	5%	1.44	2.62	0.0	0.0
Humeuze klei	2%	8.65	0.51	3.64	8.23
	5%	6.79	0.55	2.76	6.75
Kh1	2%	4.57	0.55	1.09	4.13
	5%	1.88	0.42	0.0	1.84
Kh2	2%	5.73	0.96	1.58	5.15
	5%	3.37	0.98	0.0	3.36
Kh3	2%	8.05	1.35	7.99	8.04
	5%	17.67	2.64	7.22	14.97
Veen (totaal)	2%	3.73	0.51	0.0	3.25
	5%	5.00	0.33	0.0	4.91
Kleilig veen	2%	2.70	1.04	0.0	1.90
	5%	2.30	0.96	0.0	2.27
Mineraalarm veen	2%	3.77	0.55	0.0	3.25
	5%	4.87	0.32	0.11	4.73

*Te weinig data

TABEL 5.4 RESULTERENDE KENTALLEN VOOR EFF. HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING VOOR (ISOTROPE) KLEI EN VEEN BIJ 2% EN 5% REK

Grondsoort	Rekniveau	Verw. waarde	Std.	Kar. waarde, ($\alpha = 0.75$)	Kar. waarde, ($\alpha = 1.0$)
Klei (totaal)	2%	18.64	0.43	18.30	18.54
	5%	26.45	0.4	26.17	26.36
Siltige klei	2%	25.67	1.07	25.47	25.59
	5%	29.92	0.75	29.34	29.67
Ks1	2%	-*	-*	-*	-*
	5%	-*	-*	-*	-*
Ks2	2%	23.39	0.74	22.95	23.23
	5%	29.03	0.40	28.69	29.01
Ks3	2%	24.80	1.06	24.52	24.71
	5%	28.39	0.42	28.03	28.36
Zandige klei	2%	22.65	0.68	22.33	22.61
	5%	28.01	0.69	27.90	27.97
Kz1	2%	21.70	0.57	21.41	21.65
	5%	28.17	0.68	28.07	28.10
Kz2	2%	26.20	1.25	25.85	26.10
	5%	26.47	1.18	26.17	26.30
Kz3	2%	25.30	2.22	25.15	25.28
	5%	28.76	2.18	28.55	28.62
Humeuze klei	2%	16.00	0.52	15.66	15.90
	5%	23.86	0.59	23.58	23.83
Kh1	2%	22.26	0.59	21.84	22.02
	5%	29.68	0.41	29.60	29.67
Kh2	2%	17.54	1.01	17.16	17.46
	5%	26.53	1.10	26.42	26.49
Kh3	2%	14.96	1.87	6.56	12.93
	5%	14.08	2.14	13.89	14.06
Veen (totaal)	2%	8.26	0.33	6.56	8.19
	5%	13.70	0.25	13.50	13.66
Kleilig veen	2%	9.95	0.84	9.37	9.93
	5%	16.65	0.94	15.75	15.91
Mineraalarm veen	2%	8.19	0.35	6.56	8.08
	5%	13.72	0.23	13.61	13.66

*Te weinig data

EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (CSSM)

Voor φ_{cs} is alleen de eindrek beschouwd, omdat lagere rekken niet van belang zijn voor de critical state. Voor de afleiding van de karakteristieke waarden is gebruik gemaakt van de methode volgens het WBI.

De resulterende kentallen voor φ_{cs} zijn weergegeven in Tabel 5.5 voor normaal geconsolideerde, anisotrope monsters bij de eindrek. De critical state hoek van inwendige wrijving varieert tussen de 34,5 en 48,5 graden, waarbij zandige klei de kleinste hoek van inwendige wrijving heeft en humeuze klei de grootste. De spreiding bij veen is veel kleiner en schommelt tussen de 40 en 40,7 graden. Met betrekking tot de karakteristieke waarden is wederom duidelijk te zien dat de resultaten voor dicht bij de verwachtingswaarde liggen, terwijl deze voor lager liggen.

Over het algemeen kan geconcludeerd worden dat voor de sterkteparameters φ_{cs} een verfijning van veen in kleilig veen en mineraalarm veen niet per se nodig is. Voor klei is dit wel van belang.

TABEL 5.5 RESULTERENDE KENTALLEN VOOR φ_{cs} VOOR (ANISOTROPE) KLEI EN VEEN BIJ DE EINDREK

Grondsoort	Verw. Waarde [°]	Std. [°]	Kar. waarde, ($\alpha = 0.75$) [°]	Kar. waarde, ($\alpha = 1.0$) [°]
Klei (totaal)	39.59	7.85	33.44	38.62
Siltige klei	39.19	6.86	33.84	38.22
Ks1	38.53	6.2	33.42	36.98
Ks2	38.57	6	33.62	37.51
Ks3	40.49	7.28	35.25	39.28
Zandige klei	34.99	2.57	32.74	34.46
Kz1	35.47	3.88	31.65	33.82
Kz2	36.04	1.72	34.49	35.46
Kz3	34.48	2.06	32.62	33.83
Humeuze klei	40.28	8.46	33.55	39.1
Kh1	38.24	6.2	33.13	37.39
Kh2	40.53	8.14	33.83	39
Kh3	48.46	10.93	39.43	46.02
Veen (totaal)	40.91	10.79	31.39	38.89
Kleilig veen	39.97	13.23	24.63	33.68
Mineraalarm veen	40.7	10.27	32.11	38.91

5.2 AANBEVELINGEN

Op basis van de uitgevoerde analyses zijn een aantal aanbevelingen gedaan, met betrekking tot de data selectie, de statistiek en de spreiding. Deze zijn onderstaand verder toegelicht.

DATA SELECTIE M.B.T. VOLUMIEKE GEWICHT

Tijdens de analyses zijn histogrammen gemaakt voor de natte volumieke gewichten voor verschillende klei- en veen klassen. Hierin zijn zowel aan de lage als aan de hoge kant van het histogram waarden te zien die op basis van expert judgement niet realistisch zijn voor het volumieke gewicht van de betreffende grondsoort. Dit is in de huidige studie opgelost door alleen proeven met een volumiek gewicht binnen het 90% interval van de verdeling mee te nemen in het afleiden van de parameterset. Idealiter zou het correcter zijn om verder te achterhalen in de data waar de extremen vandaan komen en foutieve metingen eruit te

halen, door te kijken naar bijvoorbeeld het watergehalte en de diepte van het monster. Dit is deels binnen dit project wel gedaan, op basis van een te laag of te hoog watergehalte, maar dit zou nog verder verdiept kunnen worden.

In Figuur 2.2 was te zien dat de proeven een grote spreiding tonen in het watergehalte en dat er veel monsters in de dataset zitten met een relatief laag watergehalte. De resulterende waarden voor het natte volumieke gewicht kunnen dan ook niet gebruikt worden voor het *verzadigde* volumieke gewicht. Nu zijn monsters met een watergehalte van minder dan 10% eruit gefilterd, omdat deze met zekerheid niet resulteren in een betrouwbare meting van het natte volumieke gewicht. Het is echter ook mogelijk om deze drempelwaarde hoger te leggen. Het zou interessant zijn om uit te zoeken wat het effect is van een andere drempelwaarde van het watergehalte op de resulterende kentallen van het natte volumieke gewicht. Daarnaast is het mogelijk om de kwaliteitsborging van de data te verbeteren door de verzadigingsgraad, porositeit en watergehalte van de monsters nader te beschouwen. Binnen deze studie zijn dergelijke, strengere kwaliteitsfilters voor het volumieke gewicht niet verder uitgezocht of toegepast, onder andere vanwege de afweging om een voldoende grote dataset over te houden voor de analyse.

DATA SELECTIE M.B.T. STERKTEPARAMETERS

Uit de verkennende analyses is gebleken dat bij hoge rekken onderscheid maken tussen isotroop en anisotroop en op basis van OCR niet van belang is, alle groepen vertonen ongeveer hetzelfde gedrag. Ten behoeve van de consistentie in de werkwijze is echter besloten om voor alle rekniveaus een selectie te maken op normaal geconsolideerd (OCR=1) en onderscheid te maken tussen isotrope en anisotrope monsters. Het nadeel daarvan is dat je datapunten misloopt bij je eindrekken. Het zou interessant zijn om te kijken of het op één hoop gooien van de data bij de eindrek zou resulteren in andere kentallen voor de sterkteparameters, meer datapunten resulteert immers over het algemeen in betrouwbaardere resultaten. Daarnaast zou ook bij de sterkteparameters een diepgaandere studie gedaan kunnen worden naar de extremen in de verdelingen, om te achterhalen wat de oorzaken zijn.

Bovendien is in paragraaf 3.1.1 toegelicht dat uitgebreidere kwaliteitsslagen mogelijk zijn op de data, omdat op basis van fysische relaties van grondgedrag waarden buiten een bepaalde range uitgesloten kunnen worden. Deze criteria zijn:

1. t is altijd kleiner dan (o.b.v. tension cut-offline)
2. De grootte van de waterspanningen u , in relatie tot normaal geconsolideerd (coëfficiënten van Skempton)
3. Met betrekking tot de korrelspanningsverhouding k_0

De bovengenoemde criteria zijn binnen deze studie niet verder uitgevoerd. Om voldoende data over te houden moest ergens de grens getrokken worden, er zijn immers ontzettend veel kwaliteitscriteria mogelijk. Het zou waardevol zijn om de bovenstaande criteria in een ander onderzoek nader te beschouwen, om onder andere te zien of een verder selectie van de data zou resulteren in andere kentallen voor de sterkte.

DATA ANALYSES

In de afgelopen jaren is, onder andere binnen dit project, een steeds grotere dataset aan proeven verzameld. Inmiddels bevat deze dataset meer dan 30.000 proeven, verspreid over een groot deel van Nederland. Zo een grote dataset biedt ontzettend veel mogelijkheden om te leren over het grondgedrag in Nederland, zoals onder andere in deze studie is laten zien.

Juist ook de datapunten waarvan we op basis van expert judgement vinden dat ze foutief zijn, bieden kansen om van te leren en daarmee in de toekomst betere data te kunnen verzamelen. Kortom, er zijn nog veel andere onderzoeken mogelijk, met behulp van de dataset, denk aan:

1. Ruimtelijke spreiding'
2. Correlaties tussen parameters
3. Informatie over zettingsparameters
4. Relatie tussen diepte van het monster en het grondgedrag

SPREIDINGSREDUCTIEFACTOR

Er is nu gekozen om voor zowel $\alpha = 0,75$ als $\alpha = 1,0$ de karakteristieke waarden af te leiden. Voor toepassing in specifieke lokale grondlagen dient de gebruiker de ruimtelijke invloed in rekening te brengen met de keuze voor α . Echter geldt dat een onderbouwing van de juiste keuze voor de spreidingsreductiefactor in de literatuur niet duidelijk is onderbouwd. Het is aan te bevelen om hier verder onderzoek naar te doen, omdat het veel invloed heeft op de resulterende karakteristieke waarden.

REKENSHEET VOOR DE COHESIE EN HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING

Met betrekking tot de berekeningen van de cohesie en de hoek van inwendige wrijving is er een aantal aspecten die extra aandacht vragen. Ten eerste is binnen deze studie in eerste instantie gebruik gemaakt van een spreadsheet op basis van statistische formules die zijn toegelicht in Bijlage C en [Calle, E. en Van Duinen, A., 2015]. In deze memo is onder andere aangekaart dat in de spreadsheets de formules voor de onder- en bovengrenzen moet worden vervangen door een voorgestelde formule. Echter bleken de voorgestelde formules nog niet geïmplementeerd te zijn in de spreadsheet. Daarom is de sheet aangepast, door de voorgestelde formules toe te passen. We raden aan om enerzijds te controleren of de spreadsheets die gebruikt worden bij de verschillende waterschappen wel de juiste formules bevatten en anderzijds om een kwaliteitsborging uit te voeren op de huidige, vigerende formules/spreadsheets.

Daarnaast is in de spreadsheet uitgegaan van de formules zoals in de schematiseringshandleiding macrostabiliteit [Rijkswaterstaat, 2021]. Hierbij is nog niet gebruik gemaakt van de vernieuwde uitgangspunten zoals in [Teunissen, 2016]. Het is daarom een aanbeveling om in de toekomst de formules in de spreadsheet aan te passen naar de vernieuwde versies.

Met betrekking tot de gepresenteerde resultaten in deze studie is het daarom belangrijk om op te merken dat we aanraden om eerst een kwaliteitsborging te doen op de gehanteerde statistische formules voor de karakteristieke waarden, voordat deze in de praktijk worden toegepast. Voor de verwachtingswaarde en de standaardafwijking geldt dit niet, deze geven een betrouwbaar beeld en geven veel inzicht in de verschillen in grondgedrag voor de klei- en veensoorten.

Daarnaast geldt dat de karakteristieke waarden van c en φ erg kunnen variëren per spanning-niveau. Het verschilt het per situatie welk spanningsniveau van belang is. Daarom is de aanbeveling om als gebruiker scherp te blijven op de gepresenteerde kentallen (voor spanning-niveaus rond 30-40 kPa), in combinatie met de gehanteerde spreidingsreductiefactoren in de betreffende situatie toegepast kunnen worden.

LANDELIJKE SPREIDING

Uit de analyses van de landelijke spreiding blijkt dat de spreiding binnen Nederland meevalt. Dit kan betekenen dat het mogelijk is om voor heel Nederland één parameterset te gebruiken voor de kentallen van de grondsterkte. Om te verifiëren dat dit mogelijk is, kan een statistische test uitgevoerd worden.

In het oosten en zuiden van Nederland zijn in sommige gevallen afwijkende resultaten te zien. Het zou het interessant zijn om te achterhalen waar de spreiding vandaan komt. Dit kan bijvoorbeeld te maken hebben met de kwaliteit van grondbeschrijvingen, geselecteerde aantallen, etc. Het zou interessant zijn om hier verdere analyses op uit te voeren om te kijken of er een trend te ontdekken valt tussen de resulterende parameters en bepaalde, iets minder voor de hand liggende eigenschappen van de proeven. Daarnaast kunnen de resultaten van de analyse gepresenteerd worden in termen van ruimtelijke correlaties.

DATAVERZAMELING IN DE TOEKOMST

Ten slotte nog een praktische aanbeveling. Voor analyses zoals deze zou het handig zijn als gebruikers in de STOWA sheet minder vrijheid hebben bij het invullen van cellen. Dit zorgt namelijk voor veel tyfoutjes en veel variatie in de manier hoe een omschrijving is gegeven. Hierdoor is er veel tijd besteed aan het omzeilen van tyfoutjes en het clusteren van verschillende omschrijvingen van hetzelfde (Bijvoorbeeld: isotroop, Isotroop, isotoop etc.). Het zou helpen als men in sommige vakken (zoals consolidatiewijze of grondsoort volgens NEN) moet kiezen uit voorgeschreven opties ('isotroop', 'anisotroop' etc. / 'ks1' etc).

Uit de data blijkt bijvoorbeeld ook dat het watergehalte, in relatie tot het nat volumieke gewicht, relatief vaak foutieve waarden bevat in de database. Het zou voor gebruikers kunnen helpen als bij het invullen van de sheet een waarschuwing wordt weergegeven als men een monster met een watergehalte van minder dan 10% wil invullen in de classificatieproef voor het afleiden van een nat volumegewicht. Hetzelfde geldt voor het watergehalte bij siltige en zandige klei. Indien het watergehalte hoger is dan 150%, dan kan het geen siltige of zandige klei zijn. Dergelijke waarschuwingen zouden ook bij andere parameters nuttig kunnen zijn.

6

REFERENTIES

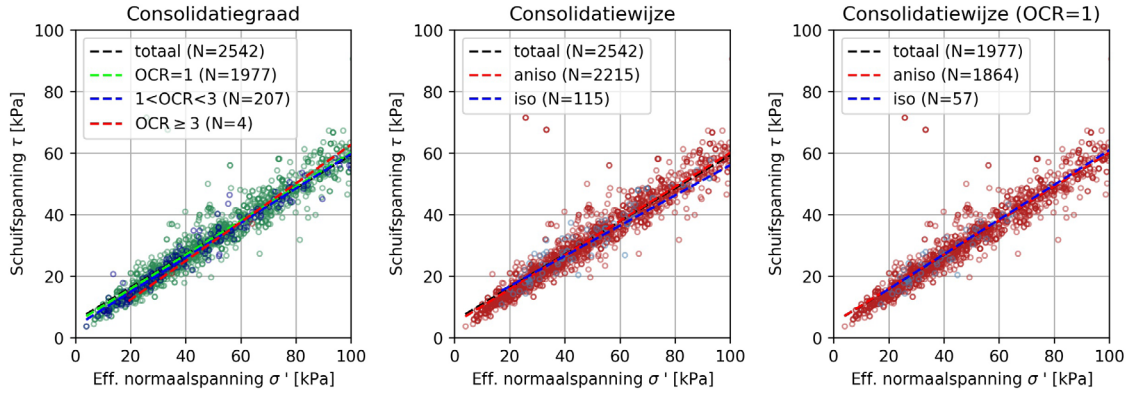
- Rijkswaterstaat, 2021.
Schematiseringshandleiding macrostabiliteit. WBI 2017. In opdracht van Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Calle, Ed en Van Duinen, Alexander, 2015.
Bepaling karakteristieke waarden schuifsterkte parameters. Deltares. In opdracht van Waterschap Rivierenland. Kenmerk 1220132-003-GEO-002.
- Tigchelaar, J. en Daggenvoorde R., 2017.
Nadere analyse landelijke database. PR3549.10. In opdracht van Rijkswaterstaat WVL.
- Deltares/STOWA, 2011.
Protocol voor het uitvoeren van laboratoriumproeven (versie 5). Deltares, STOWA, juni 2011.
- Teunissen, H., 2016.
Wrijving in sterkteberekeningen. Geotechniek, juli 2016
- Waterschap Rivierenland, 2022.
Spreadsheet Analyse DSS parameters, methode Deltares, maart 2022.
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 1988.
Leidraad cel- en triaxiaalproeven, oktober 1988.
- Verruijt, A., 2001
Grondmechanica, Technische Universiteit Delft, 2001

BIJLAGE A

STERKTEPARAMETERS

A.1 15% REK

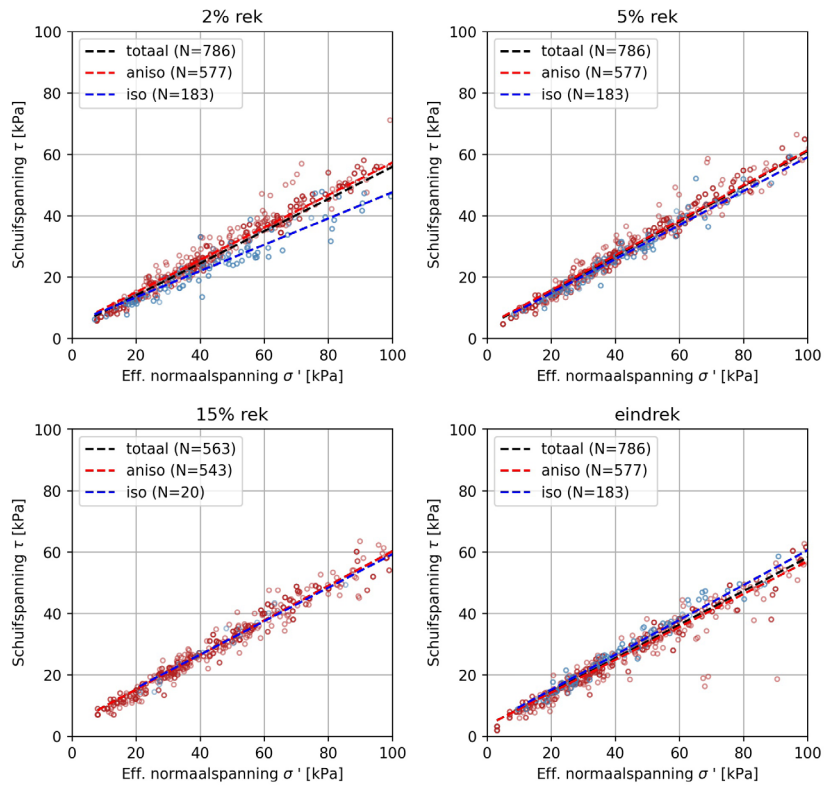
FIGUUR 6.1 ANALYSES VOOR 15% REK, VOOR ALLE KLEISOORTEN, GEBASEERD OP TRIAXIAALPROEVEN



A.2 CONSOLIDATIEWIJZE VOOR FIJNE KLEIKLASSEN

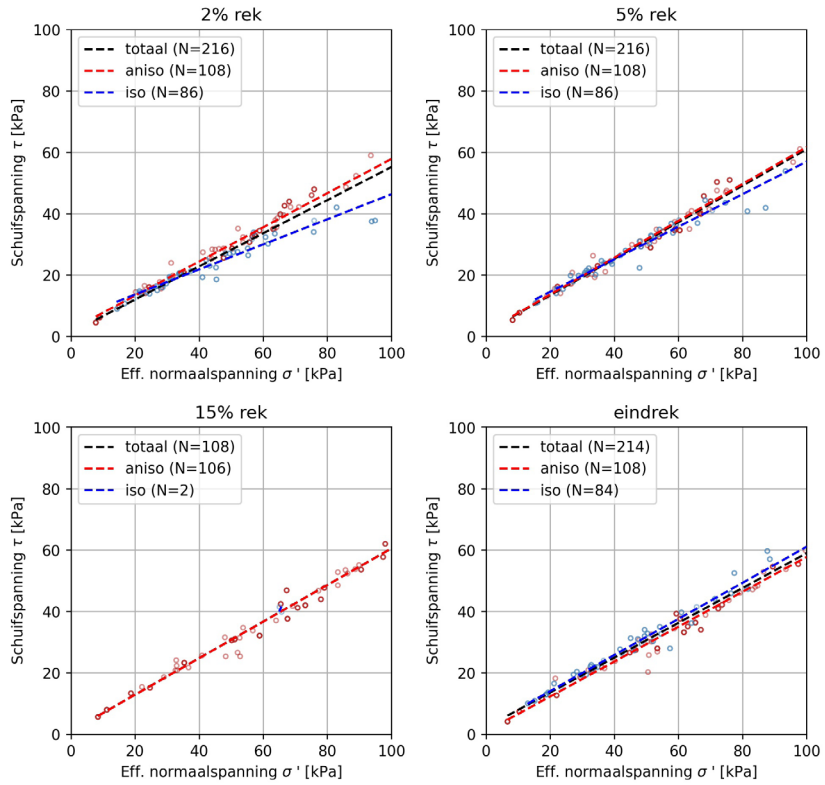
A.2.1 SILTIGE KLEI

FIGUUR 6.2 VERGELIJKING ISOTROOP VS. ANISOTROOP GECONSOLIDEERD VOOR SILTIGE KLEI



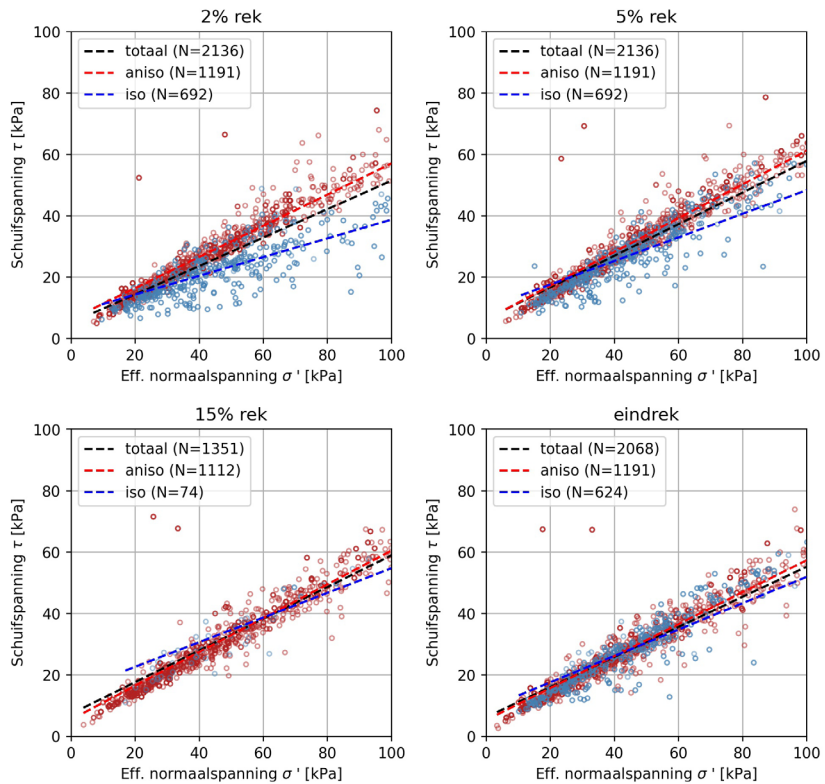
A.2.2 ZANDIGE KLEI

FIGUUR 6.3 VERGELIJKING ISOTROOP VS. ANISOTROOP GECONSOLIDEERD VOOR ZANDIGE KLEI



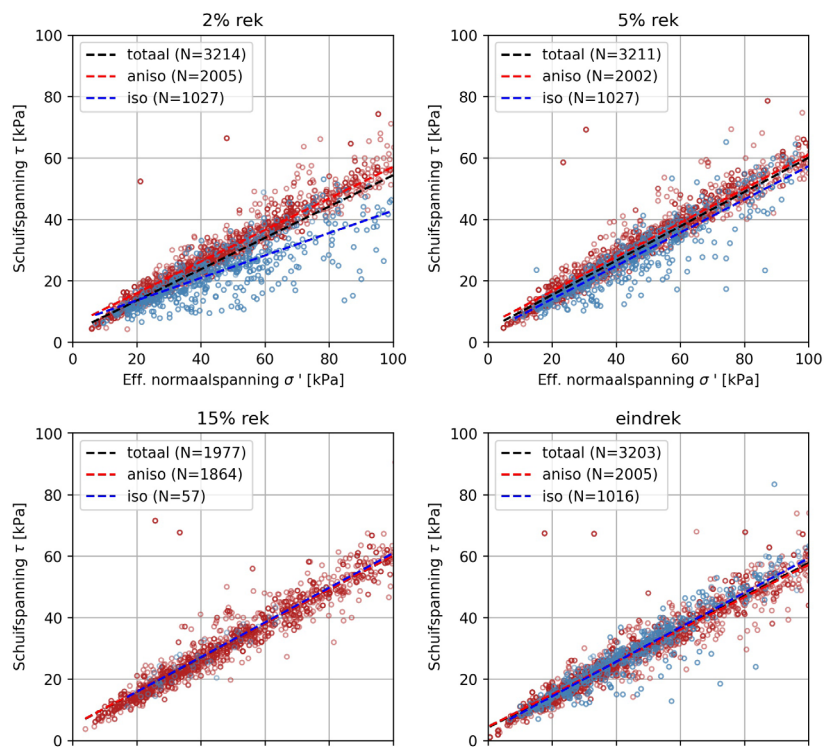
A.2.3 HUMEUZE KLEI

FIGUUR 6.4 VERGELIJKING ISOTROOP VS. ANISOTROOP GECONSOLIDEERD VOOR HUMEUZE KLEI



A.3 CONSOLIDATIEWIJZE (OCR=1)

FIGUUR 6.5 VERGELIJKING VAN NORMAAL GECONSOLIDEERDE ISOTROPE EN ANISOTROPE KLEIMONSTERS, PER REKNIVEAU, OP BASIS VAN TRIAXIAALPROEVEN



A.4 ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE RATIO S

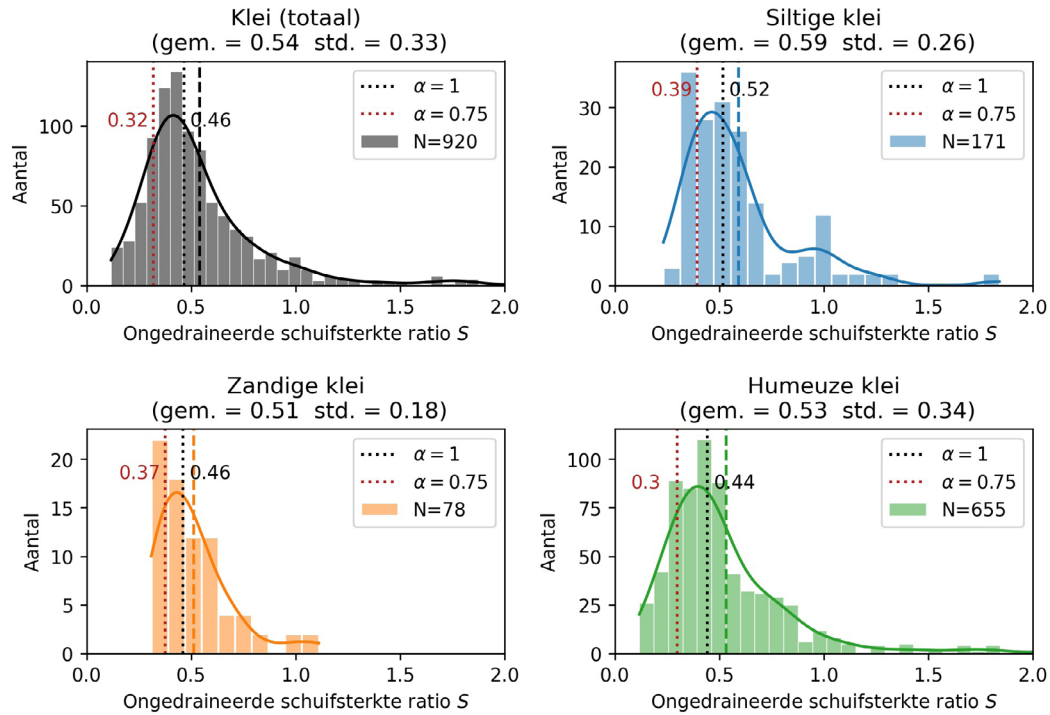
A.4.1 ISOTROOP

TABEL 6.1 RESULTERENDE KENTALLEN VOOR S VOOR ISOTROPE KLEI EN VEEN BIJ VERSCHILLENDE REKNIVEAUS

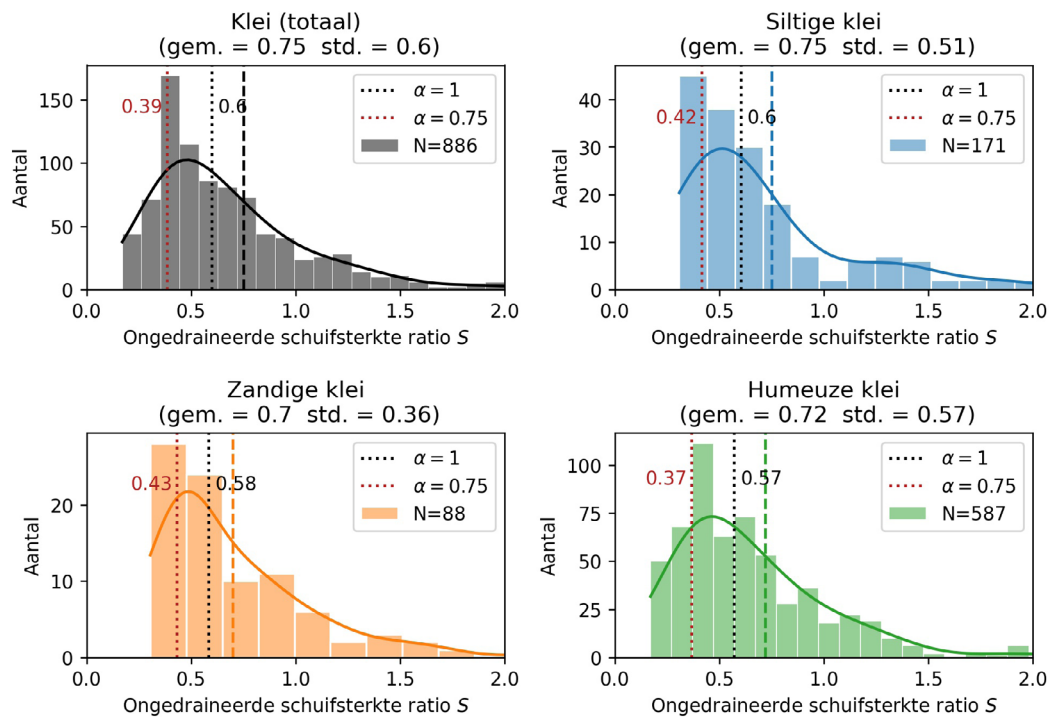
Grondsoort	Parameter	2%	5%	PIEK	EIND
Klei (totaal)	Gem.	0.54	0.68	0.79	0.75
	Std.	0.33	0.45	0.61	0.6
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.32	0.38	0.42	0.39
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.46	0.57	0.64	0.6
Ks	Gem.	0.59	0.72	0.8	0.75
	Std.	0.26	0.39	0.51	0.51
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.39	0.45	0.46	0.42
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.52	0.61	0.66	0.6
Ks1	Gem.	0.94	1.33	1.45	1.4
	Std.	0.6	1.03	1.2	1.19
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.36	0.4	0.4	0.36
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.5	0.59	0.6	0.55
Ks2	Gem.	0.61	0.74	0.84	0.79
	Std.	0.25	0.33	0.44	0.45
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.41	0.47	0.48	0.43
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.52	0.62	0.67	0.61

Ks3	Gem.	0.54	0.66	0.73	0.67
	Std.	0.2	0.29	0.42	0.42
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.39	0.45	0.46	0.41
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.49	0.57	0.61	0.55
Kz	Gem.	0.51	0.6	0.73	0.7
	Std.	0.18	0.23	0.36	0.36
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.37	0.42	0.46	0.43
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.46	0.53	0.62	0.58
Kz1	Gem.	0.52	0.6	0.64	0.6
	Std.	0.2	0.25	0.29	0.29
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.37	0.41	0.43	0.39
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.46	0.52	0.54	0.5
Kz2	Gem.	0.62	0.8	1.04	1.01
	Std.	0.08	0.14	0.3	0.32
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.53	0.63	0.69	0.63
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.57	0.7	0.82	0.77
Kz3	Gem.	0.42	0.49	0.56	0.55
	Std.	0.12	0.15	0.15	0.14
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.31	0.35	0.42	0.42
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.36	0.41	0.48	0.47
Kh	Gem.	0.53	0.66	0.77	0.72
	Std.	0.34	0.46	0.58	0.57
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.3	0.36	0.39	0.37
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.44	0.55	0.61	0.57
Kh1	Gem.	0.59	0.76	0.91	0.85
	Std.	0.37	0.57	0.89	0.88
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.33	0.39	0.42	0.39
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.49	0.6	0.67	0.62
Kh2	Gem.	0.43	0.54	0.62	0.59
	Std.	0.19	0.25	0.3	0.29
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.27	0.33	0.37	0.35
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.37	0.46	0.52	0.49
Kh3	Gem.	0.44	0.6	0.66	0.63
	Std.	0.22	0.3	0.35	0.35
	Kar. ($\alpha = 0.75$)	0.27	0.36	0.38	0.36
	Kar. ($\alpha = 1.0$)	0.36	0.49	0.52	0.5

FIGUUR 6.6 SCHUIFSTERKTE RATIO S VOOR NORMAAL GECONSOLIDEERDE, ISOTROPE KLEIMONSTERS BIJ 2% REK, BEPAALD O.B.V. ONGEDRAINEERDE TRIAXIAALPROEVEN, PER KLEISOORT



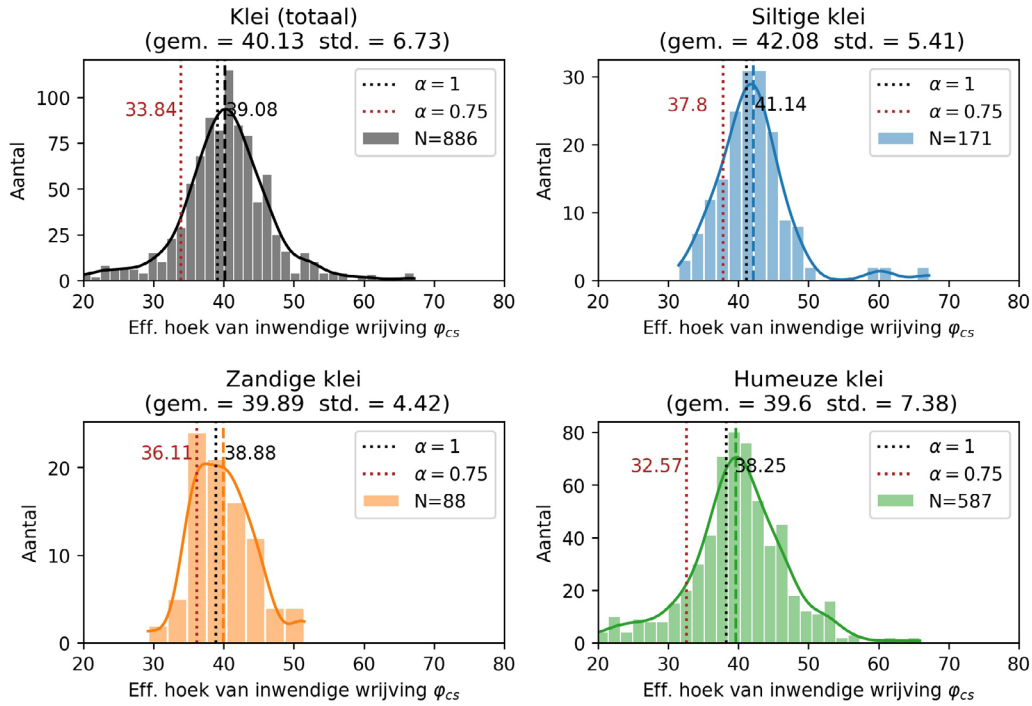
FIGUUR 6.7 SCHUIFSTERKTE RATIO S VOOR NORMAAL GECONSOLIDEERDE, ISOTROPE KLEIMONSTERS BIJ DE EINDREK, BEPAALD O.B.V. ONGEDRAINEERDE TRIAXIAALPROEVEN, PER KLEISOORT



A.5 EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (CSSM)

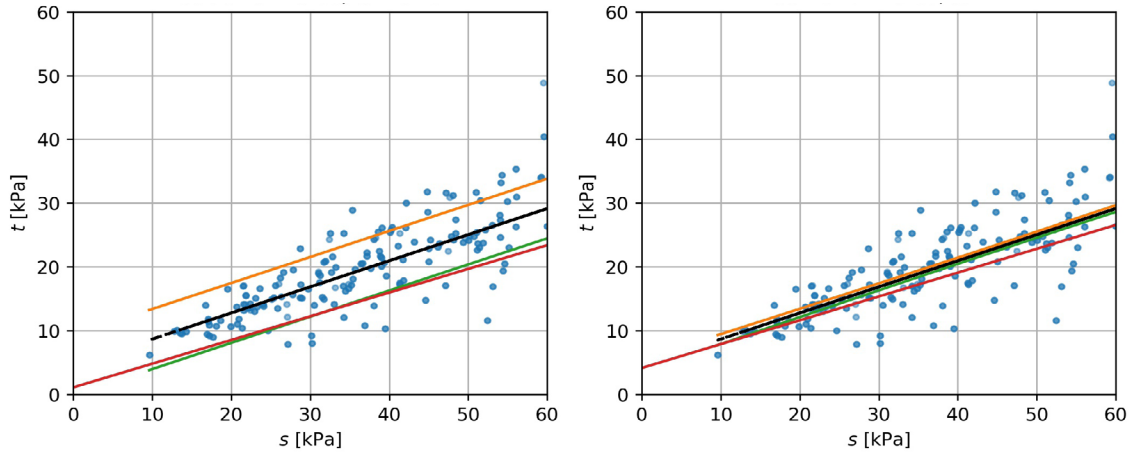
A.5.1 ISOTROOP

FIGUUR 6.8 EFFECTIEVE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (CSSM) VOOR NORMAAL GECONSOLIDEERDE, ISOTROPE KLEIMONSTERS BIJ DE EINDREK, BEPAALD O.B.V. ONGEDRAINEERDE TRIAXIAALPROEVEN, PER KLEISOORT

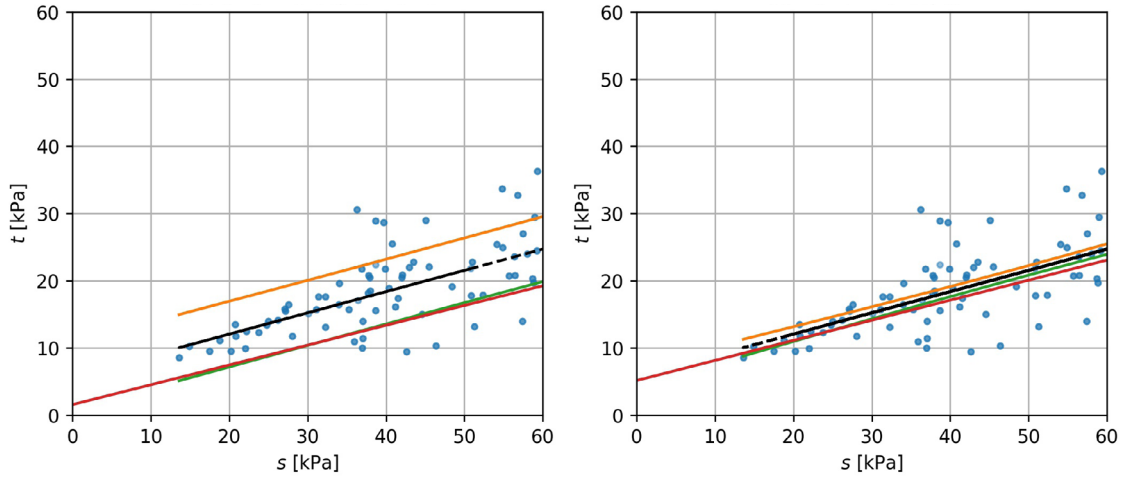


A.6 COHESIE EN HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING (MOHR-COULOMB)

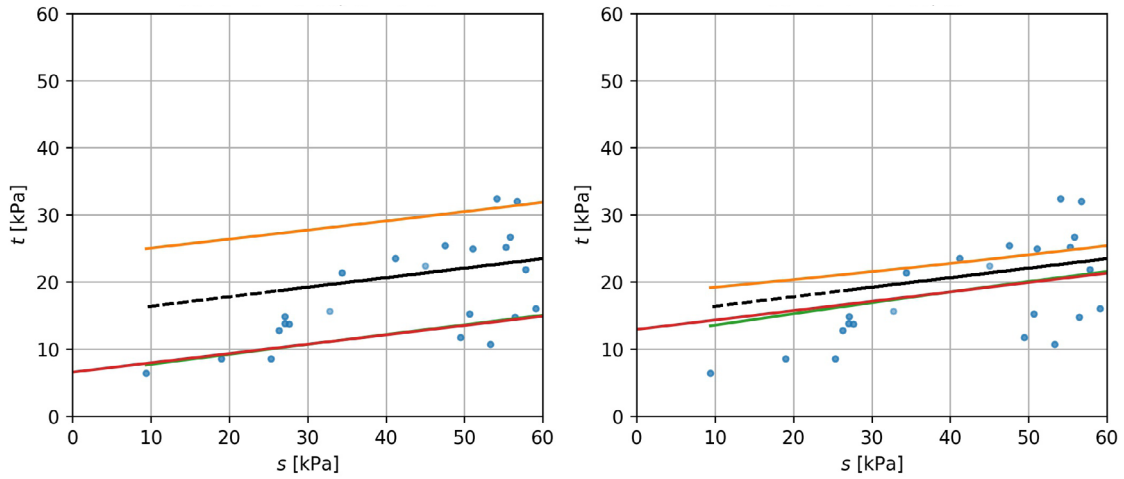
FIGUUR 6.9 AFLEIDING C EN PHI VOOR ISOTROPE ZWAK HUMEUZE KLEI BIJ 2% REK (LINKS $\alpha=0.75$ EN RECHTS $\alpha=1$)



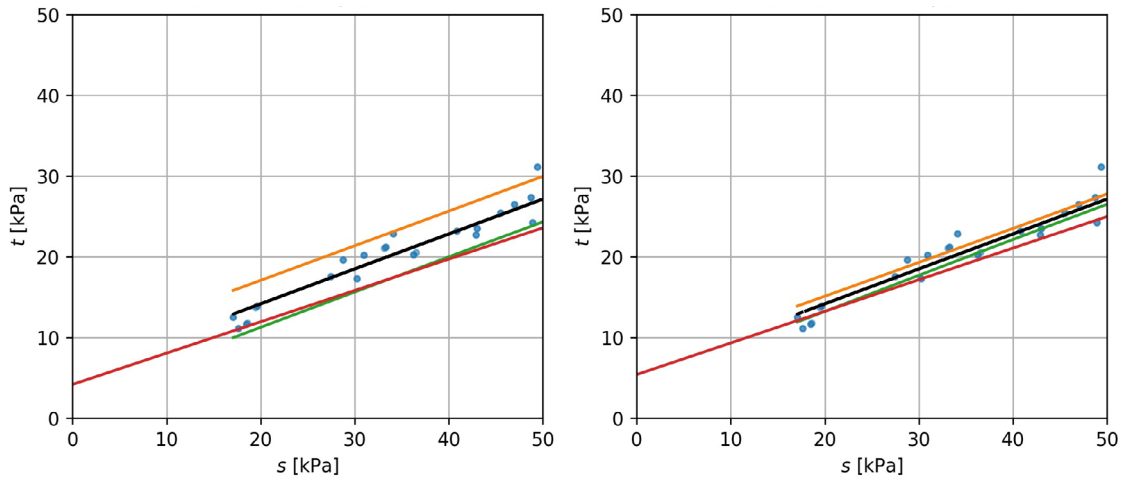
FIGUUR 6.10 AFLEIDING C EN PHI VOOR ISOTROPE MATIG HUMEUZE KLEI BIJ 2% REK (LINKS $\alpha=0.75$ EN RECHTS $\alpha=1$)



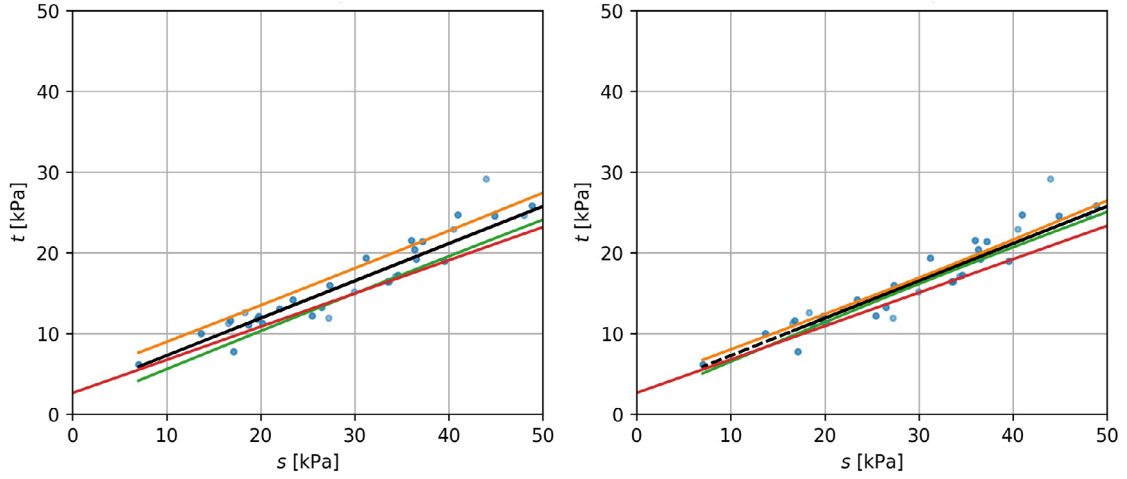
FIGUUR 6.11 AFLEIDING C EN PHI VOOR ISOTROPE STERK HUMEUZE KLEI BIJ 2% REK (LINKS $\alpha=0.75$ EN RECHTS $\alpha=1$)



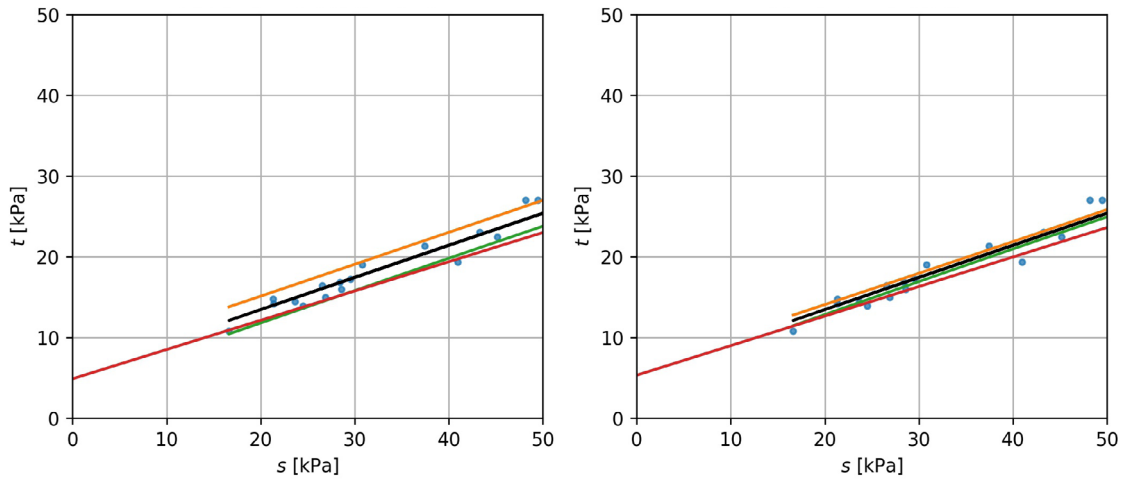
FIGUUR 6.12 AFLEIDING C EN PHI VOOR ISOTROPE MATIG SILTIGE KLEI BIJ 2% REK (LINKS $\alpha=0.75$ EN RECHTS $\alpha=1$)



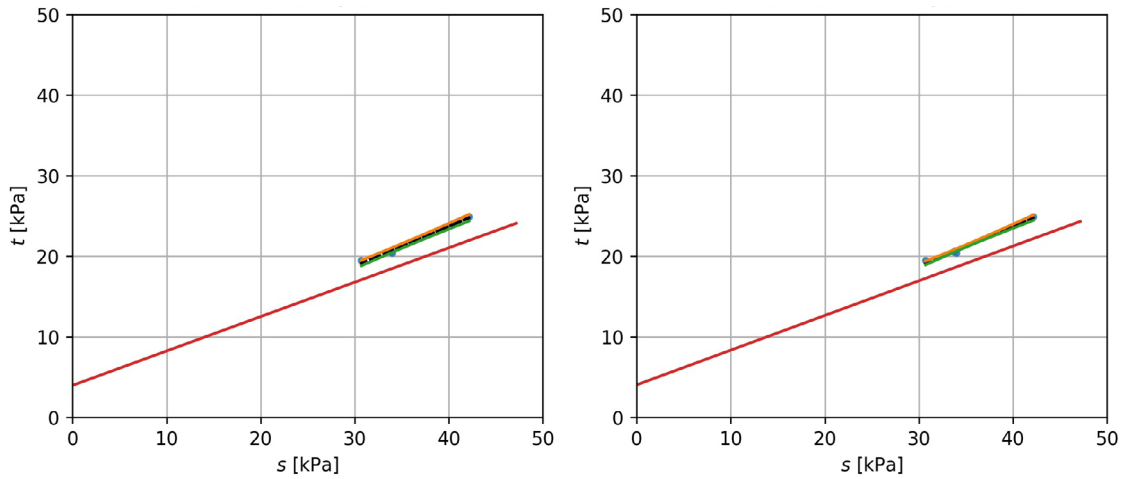
FIGUUR 6.13 AFLEIDING C EN PHI VOOR ISOTROPE STERK SILTIGE KLEI BIJ 2% REK (LINKS $\alpha=0.75$ EN RECHTS $\alpha=1$)

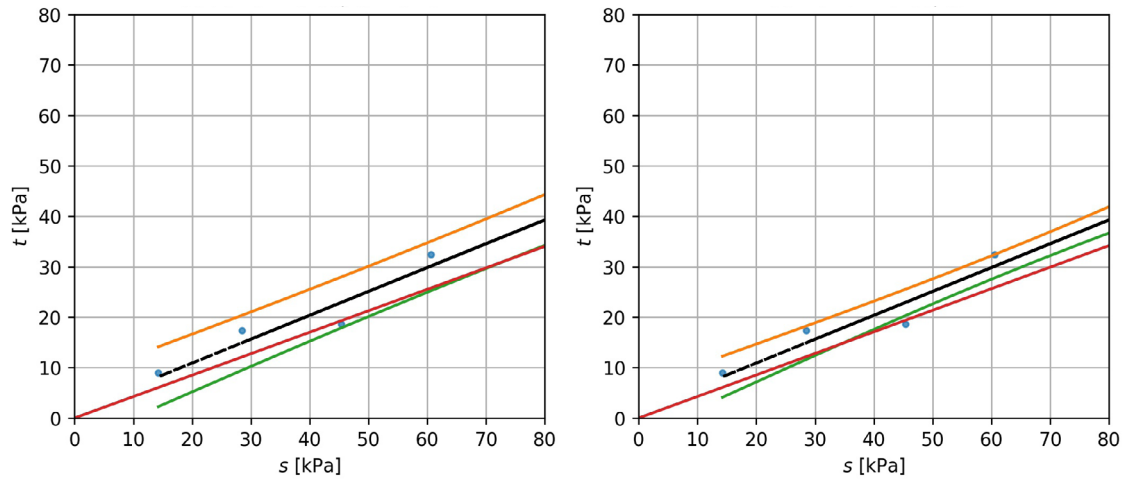


FIGUUR 6.14 AFLEIDING C EN PHI VOOR ISOTROPE ZWAK ZANDIGE KLEI BIJ 2% REK (LINKS $\alpha=0.75$ EN RECHTS $\alpha=1$)



FIGUUR 6.15 AFLEIDING C EN PHI VOOR ISOTROPE MATIG ZANDIGE KLEI BIJ 2% REK (LINKS $\alpha=0.75$ EN RECHTS $\alpha=1$)



FIGUUR 6.16 AFLEIDING C EN PHI VOOR ISOTROPE MATIG HUMEUZE KLEI BIJ 2% REK (LINKS $\alpha=0.75$ EN RECHTS $\alpha=1$)

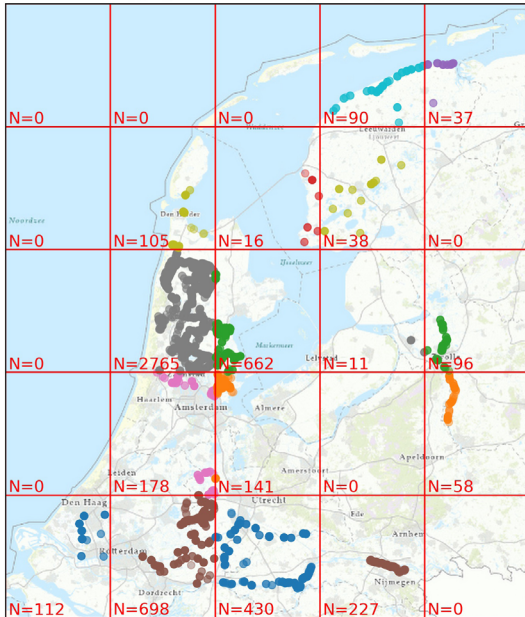
BIJLAGE B

ANALYSES LANDELIJKE SPREIDING

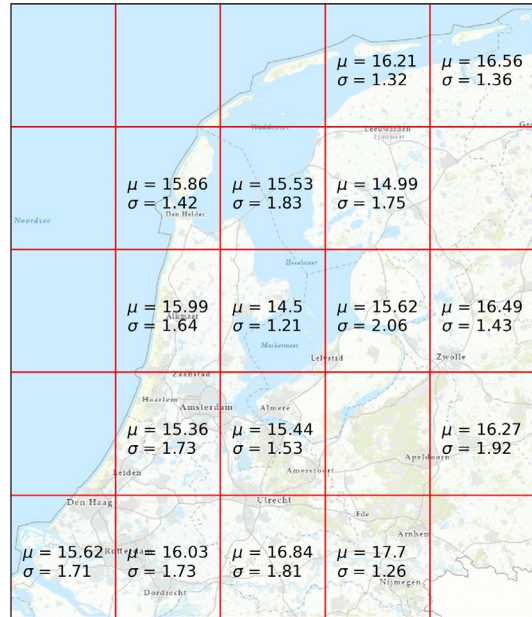
B.1 KLEI

Landelijke spreiding van het volumieke gewicht (nat) van humeuze klei o.b.v. classificatieproeven

Ligging en aantal metingen per groep

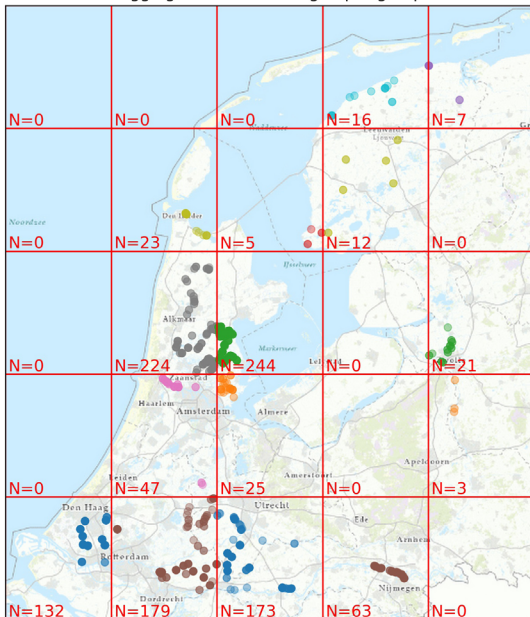


Gemiddelde en standaardafwijking van γ_n (tot: $\mu = 15.92, \sigma = 1.74$)

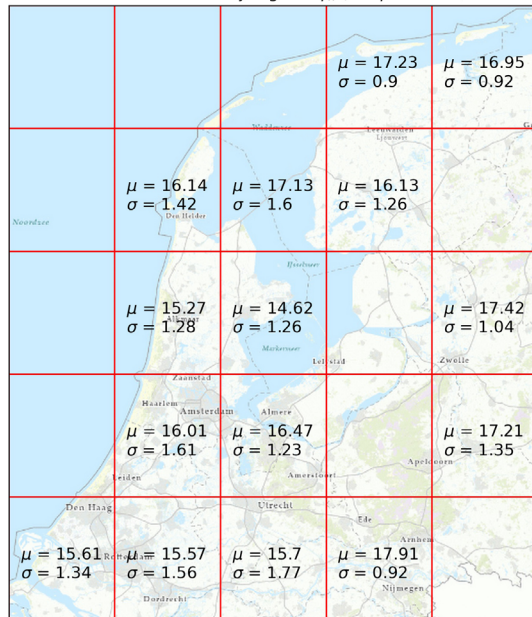


Landelijke spreiding van het volumieke gewicht (nat) van siltige klei o.b.v. classificatieproeven

Ligging en aantal metingen per groep

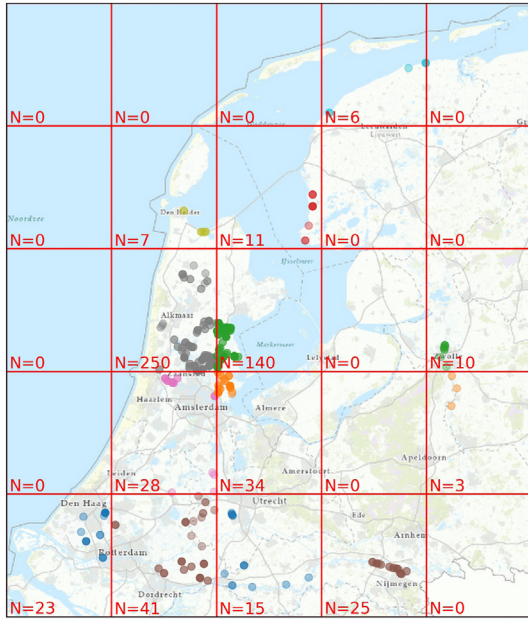


Gemiddelde en standaardafwijking van γ_n (tot: $\mu = 15.59, \sigma = 1.61$)

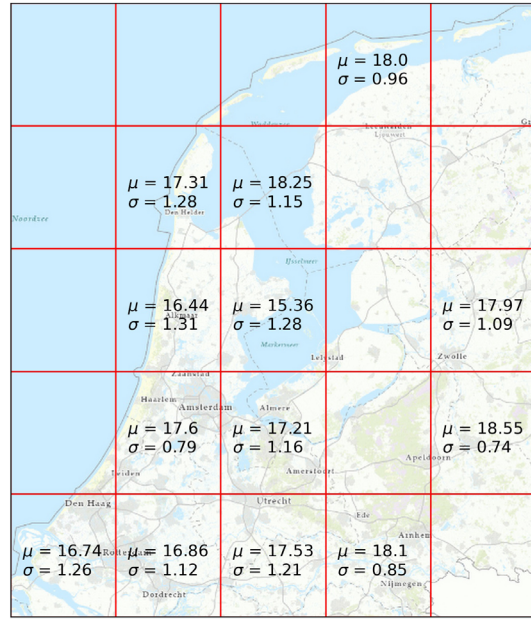


Landelijke spreiding van het volumieke gewicht (nat) van zandige klei o.b.v. classificatieproeven

Ligging en aantal metingen per groep



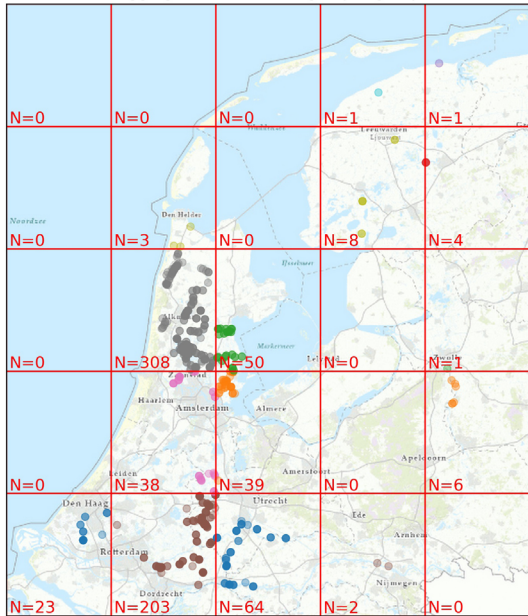
Gemiddelde en standaardafwijking van γ_n (tot: $\mu = 16.52, \sigma = 1.47$)



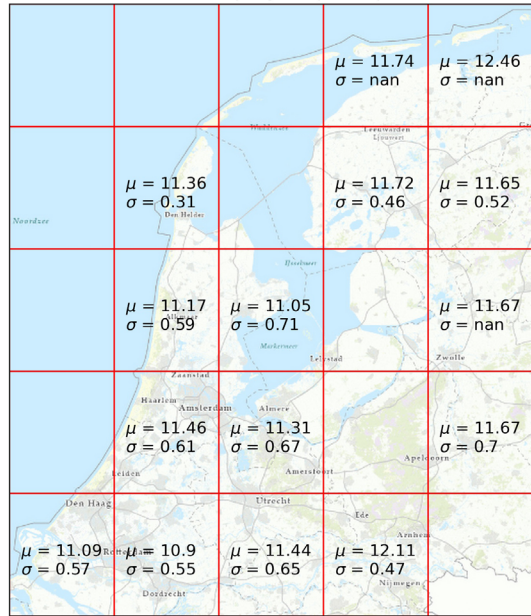
B.2 VEEN

Landelijke spreiding van het volumieke gewicht (nat) van kleilig veen o.b.v. classificatieproeven

Ligging en aantal metingen per groep

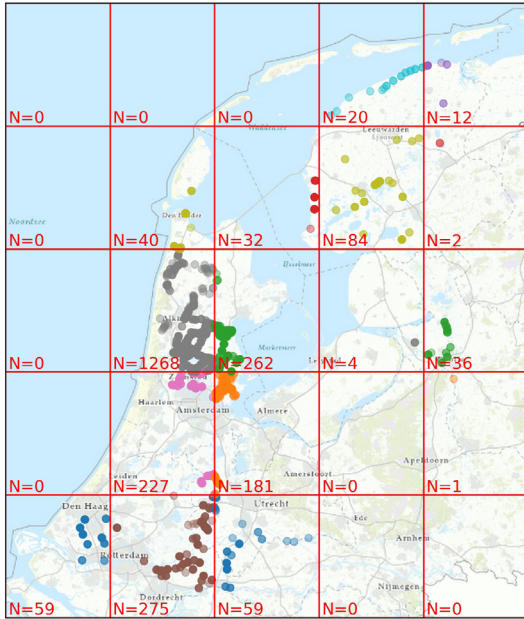


Gemiddelde en standaardafwijking van γ_n (tot: $\mu = 11.15, \sigma = 0.63$)

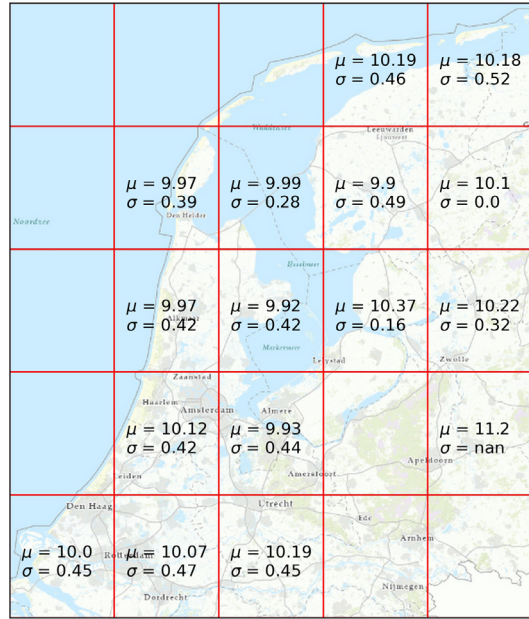


Landelijke spreiding van het volumieke gewicht (nat) van mineraalarm veen o.b.v. classificatieproeven

Ligging en aantal metingen per groep



Gemiddelde en standaardafwijking van γ_n (tot: $\mu = 10.0, \sigma = 0.43$)



BIJLAGE C

STATISTISCHE FORMULES C EN PHI

In de oorspronkelijke spreadsheet is onderstaande formule gebruikt voor de karakteristieke boven- en ondergrens:

$$\bar{t}_{kar} = \hat{a}_1 + \hat{a}_2 \cdot s \pm t_{n-2}^{0.95} \sqrt{(\sigma^2(\hat{a}_1) + s^2 \cdot \sigma^2(\hat{a}_2) + 2\rho(\hat{a}_1, \hat{a}_2) \cdot s \cdot \sigma(\hat{a}_1) \cdot \sigma(\hat{a}_2)) \cdot (n(1 - \alpha) + 1)}$$

In [Calle, E. en Van Duinen, A., 2015] is omschreven waarom deze formule niet kan worden toegepast. De juiste formule luidt volgens deze memo als volgt:

$$\bar{t}_{kar} = \hat{a}_1 + \hat{a}_2 \cdot s \pm t_{n-2}^{0.95} \sqrt{\sigma^2(\hat{a}_1) + s^2 \cdot \sigma^2(\hat{a}_2) + 2\rho(\hat{a}_1, \hat{a}_2) \cdot s \cdot \sigma(\hat{a}_1) \cdot \sigma(\hat{a}_2) + (1 - \alpha) \cdot S_t^2}$$

in deze formules zijn:

- \hat{a}_1 de schatter voor de cohesie
- \hat{a}_2 de schatter voor de eff. hoek van inwendige wrijving

Voor een uitleg over de andere parameters en de achterliggende wiskundige afleidingen wordt verwezen naar de memo [Calle, E. en Van Duinen, A., 2015].