Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Technische Leidraad Katern Dijklichaam en ondergrond

26 november 2026

Inhoudsopgave

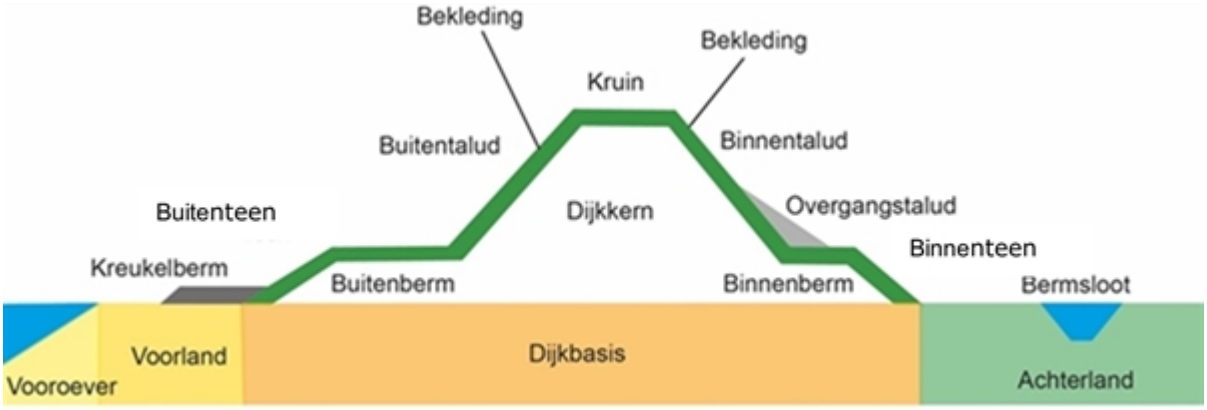
1. Grondlichaam en ondergrond 4
Definitie en elementen van een dijklichaam 4
Definitie elementen van de ondergrond 6
Constructieve functies van de ondergrond 7
Relatie grondlichaam en ondergrond met belastingen 9
Definitie hoogtegeometrie 10
Schematiseren hoogtegeometrie 11
2. Karakteriseren van dijklichaam en ondergrond 12
2.1 Opbouw dijklichaam 12
Opbouw dijklichaam 12
2.2 Opbouw ondergrond 13
Geologische beschrijving van de ondergrond 13
Klei 18
Veen 18
Silt (leem) 20
Zand 21
2.3 Bepalen van grondeigenschappen 22
Bepalen van grondeigenschappen 22
Basisopzet van grondonderzoek 23
Strategie opzet grondonderzoek 28
Gebruik van beschikbare informatie bij grondonderzoek 34
Grondonderzoek van grof naar fijn 41
2.4 Schematiseren van de ondergrond 48
Introductie stochastische ondergrondschematisatie (SOS) 48
Schematiseren van de ondergrond 50
Onzekerheid in schematisering ondergrond in rekening brengen 56
Meet- en onderzoekstrategie voor de grondopbouw (inclusief dichtheid) 57
Geotechnische boringen en boormonstername voor de grondopbouw 62
Sonderingen (en de verschillende typen) voor de grondopbouw (incusief correlaties) 62
Geofysische metingen (en de verschillende soorten) voor de grondopbouw 64
Laboratoriumonderzoek (met name de classificatie-onderzoeken) voor de grondopbouw 65
Gebruik van registratie-objecten uit de Basisregistratie Ondergrond (BRO) voor de grondopbouw 65
Gebruik van geologische informatie, zoals kaarten 66
Geohydrologische aspecten bij het schematiseren van de grondopbouw 66
3. Grondlaageigenschappen 67
Definitie (grond)laageigenschappen (geotechnisch en geohydrologisch) 67
Meet- en onderzoekstrategie voor de laageigenschappen (inclusief dichtheid) 68
Geotechnische boringen en boormonstername voor de laageigenschappen 69
Sonderingen (en de verschillende typen) voor de laageigenschappen (inclusief correlaties) 69
Laboratoriumonderzoek voor de laageigenschappen 70
Schematiseren grondlaageigenschappen 71

4. Grondeigenschappen 72
Definitie grondeigenschappen 72
Van grondgedrag naar grondeigenschappen 72
Omgang met ruimtelijke variatie, anisotropie en onzekerheden bij grondeigenschappen 73
Karakteristieke waarde, rekenwaarde of stochasten voor grondeigenschappen 73
Classificatieparameters 74
Korrelverdeling 74
Plasticiteit 76
Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S 77
Sterktetoename-exponent m 83
Freatische en elastische waterberging in grond 85
Erosiegevoeligheid/-bestendigheid 87
Verwerking van grondmaterialen tijdens uitvoering 89
Meet- en onderzoekstrategie voor grondeigenschappen (inclusief dichtheid) 91
Geotechnische boringen en boormonstername voor grondeigenschappen 91
Erosiemetingen voor grondeigenschappen 91
Laboratoriumonderzoek voor grondeigenschappen 92
Gebruik waarden voor grondeigenschappen uit Normen en Richtlijnen 97
Schematiseren grondeigenschappen 98
5. Gebruik van gegevensbronnen 101
Gebruik van gegevensbronnen (BRO en kaarten) voor grondlaageigenschappen 101
Gebruik van registratie-objecten uit de BRO en NHI voor grondwaterdata 102
Gebruik van registratie-objecten uit de Basisregistratie Grootschalige Topografie (BGT) voor verkeersbelasting 103

1. Grondlichaam en ondergrond

Definitie en elementen van een dijklichaam

De elementen van een dijklichaam worden in dit artikel gedefinieerd aan de hand van het dwarsprofiel, zie Figuur 1. Een dijk kent een binnen- en buitenzijde, aan de binnenzijde van het dijklichaam grenst het te beschermen achterland. Aan de buitenzijde grenst het te keren water of een uiterwaarde ook wel de vooroever of het voorland genoemd. Verder zal er in dit artikel een onderscheid worden gemaakt tussen primaire en belangrijke elementen. Alle dijken in Nederland hebben de primaire elementen van een dijklichaam. De bijzondere elementen komen voor in specifieke gevallen.

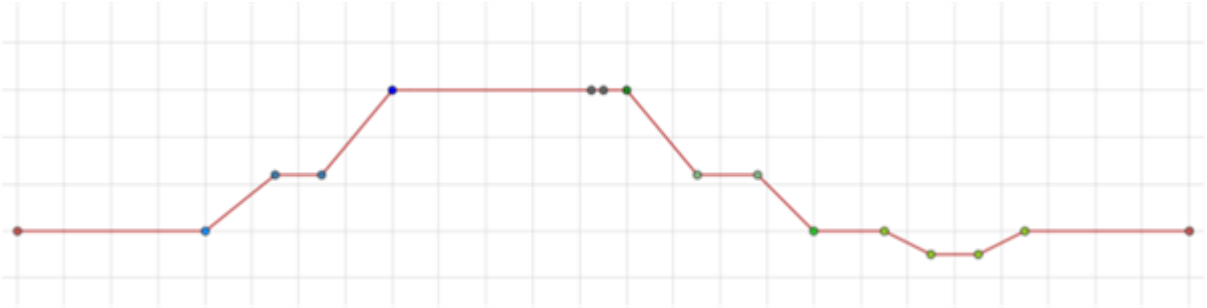


Figuur 1 Schematisatie van het dwarsprofiel.

Primaire elementen

Hoogtegeometrie

De hoogtegeometrie beschrijft de schematisering van de dwarsprofiel hoogte van een dijk, met andere woorden de ligging van het maaiveld. De hoogtegeometrie van een dijk bestaat uit karakteristieke punten met rechte lijnen tussen twee punten. Karakteristieke punten van een dijk zijn punten zoals het binnentalud, het buitentalud en de kruin [D-Soil Model, 2017]. Deze punten zijn belangrijk bij bijvoorbeeld het schematiseren van de waterspanningen voor stabiliteitsberekeningen. Een voorbeeld van een hoogtegeometrie is in Figuur 2 weergegeven.



Figuur 2 Voorbeeld van de hoogtegeometrie van een dijk [D-Soil Model, 2017].

Kruin

De kruin is de (meestal vlakke) top van het dijklichaam, deze heeft een bepaalde kruinhoogte en -breedte. Een voldoende hoge kruin voorkomt significante golfoverslag. Een te hoog golfoverslagdebiet kan leiden tot erosie van het binnentalud of oppervlakkige of diepe afschuiven [Technisch rapport waterkerende grondconstructies, 2001].

Dijkkern

De dijkkern geeft stabiliteit aan het dijklichaam. Het is van belang dat de dijkkern stabiel blijft bij veranderingen in interne of externe belastingen. De benodigde afmetingen van de dijkkern hangen af van de sterkteparameters van de grondsoort, de dijkbasis, de kruinhoogte en de belasting. De dijkkern wordt tegenwoordig vooral met zand gemaakt, echter zijn er ook dijkkernen in Nederland van klei of veen.

Meerdere elementen van de dijkkern zijn van belang. Het gewicht en de schuifsterkte van de ondergrond voorkomt het zijdelings wegschuiven van de dijk bij een te hoge waterstand. Het gewicht kan echter ook (samen met andere elementen) leiden tot zettingen in de ondergrond. De doorlatendheid van de dijkkern heeft invloed op de snelheid van verandering van waterspanningen in de dijk. Bij een snelle verhoging van waterstanden blijven de grondspanningen gelijk en kunnen waterspanningen in een slecht doorlatende dijkkern oplopen, hierdoor neemt de schuifsterkte af. De dijkbasis bepaalt mede de lengte van de kwelweg voor grondwater dat door de watervoerende zandlagen onder de dijk naar het achterland loopt en bepaalt daarmee de grootte van het verhang dat kan leiden tot piping.

Meestal is de grondsamenstelling van de dijkkern niet geschikt om belastingen van golven, stromingen etc. te weerstaan en is daarom vaak beschermd door een dijkbekleding.

Buitentalud

Het buitentalud is de helling vanaf de kruin van de dijk richting de buitenteen of buitenberm van de dijk. Het ontwerp van het buitentalud hangt af van de belasting en de afmetingen van de buitenberm. Een flauwe taludhelling reduceert de golfoploop en daarmee het overslagdebiet. Dit leidt tot een lagere kruinhoogte.

Binnentalud

Het binnentalud is de helling vanaf de kruin naar de binnenteen. Bij zeer hoge waterstanden is de helling van het binnentalud medebepalend voor de geotechnische stabiliteit van de dijk. Tijdens hoge waterstanden is de schuifsterkte van de dijk gereduceerd door toename van waterspanningen in de dijk en ondergrond. De taludhelling heeft ook invloed op de erosie bij hoge waterstanden en/of golfoverslag. Met een steile helling versnelt het water langs het binnentalud en is er kans op meer erosie. Verder kan overslaand water via het binnentalud de dijk infiltreren en leiden tot verweking en vervolgens stabiliteitsverlies van de dijk. Het kiezen van de juiste bekleding kan dit vertragen of voorkomen.

Bekleding

De dijkbekleding is een extra laag die op de dijkkern wordt aangebracht ter bescherming van de kruin, taluds en bermen. De dijkbekleding loopt uiteen van een kleilaag met gras tot een steenbedekking of asfaltbekleding. Het type bekleding bepaalt de mate van erosiebestendigheid en waterdoorlaatbaarheid. De dijkbekleding voorkomt/of vertraagt daardoor het ontstaan van erosie of de mate van infiltratie van water in de dijkkern. Steenbekleding op een buitentalud voorkomt erosie door golfaanval en kan de mate van golfoploop en golfoverslag reduceren.

Buitenteen

De buitenteen van een dijk is het gebied waar de dijk kruist met de vooroever of het voorland. Soms is er een constructie bij deze overgang, dan heet deze de teenconstructie [Leidraad zee- en meerdijken, 1999].

Binnenteen

De binnenteen van de dijk is het gebied waar de dijk kruist met het achterland.

Bijzondere elementen

Buitenberm

De buitenberm is een (meestal vlak) gebied aan het einde van het buitentalud. Een buitenberm wordt vanuit de waterkerende functie toegepast bij zee- en meerdijken om de golfoverslag te verminderen. Het ontwerp van de buitenberm hangt af van de te voorkomen golfoverslag en afmetingen van het buitentalud. Een buitenberm geeft een grotere dijkbasis en verlengt daarom ook de kwelweg, waardoor de aandrijvende kracht tijdens piping wordt verminderd.

Binnenberm

Een binnenberm wordt toegepast om de stabiliteit van het binnentalud te vergroten door onder andere de schuifweerstand te vergroten. Een tweede reden om een binnenberm toe te passen is om de kans op piping en/of opdrijven/opbarsten te verlagen door verlenging van de dijkbasis en daarmee de kwelweglengte [Technisch rapport waterkerende grondconstructies, 2001.

Kreukelberm

Een kreukelberm (ook wel plasberm, teenbestorting of lage buitenberm genoemd) beschermt een buitentalud met een harde bekleding. De harde bekleding kan namelijk worden aangetast door golven of stroming. Een kreukelberm werkt als een overgang tussen de harde bekleding en de grond van de vooroever of het voorland. Bij zeedijken ligt de lage buitenberm boven laagwater en bij meerdijken op het laagste meerpeil [Technisch rapport, 2001].

Overgangstalud

Een overgangstalud is een extra talud dat kan worden toegepast op het binnentalud om uittredend kwelwater te voorkomen. Dit vergroot de schuifsterkte en verkleint de kans op micro-instabiliteit. De plaats van het overgangstalud wordt bepaald door de plaats waar kwel optreedt.

Bermsloot of kwelsloot

De bermsloot of kwelsloot is een sloot achter de dijk aan de binnenzijde van de dijk. De bermsloot kan een gunstige invloed hebben op de grondwaterstand en de waterspanningen in de dijk en het achterland. Als de afsluitende laag in de bermsloot echter te dun is, kan er opbarsten optreden en een startpunt voor pipevorming ontstaan.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Definitie elementen van de ondergrond

Elementen

Maaiveld/hoogtegeometrie

De hoogte van het grondoppervlak in Nederland gemeten ten opzichte van het Normaal Amsterdams Peil (NAP). Een NAP-hoogte van 0 m is ligt ongeveer 0,1 m onder gemiddeld zeeniveau langs de Nederlandse kust.

Grondlaag

Een laag in de ondergrond met min of meer dezelfde eigenschappen, veroorzaakt door vergelijkbare omstandigheden tijdens het afzetten van het sediment of de vorming van het veen. De dikte van de laag kan variëren van minder dan één decimeter (bijvoorbeeld de Basisveenlaag) tot meerdere meters. Voor faalmechanismen is een relevante lengte en breedte van een grondlaag minimaal 10-20 m.

Laagscheidingen

Overgang tussen verschillende lagen, dit kan zowel in verticale als horizontale richting zijn.

Laageigenschappen

Eigenschappen zoals sterkteparameters of volumiek gewicht, die representatief zijn voor een grondlaag. Afhankelijk van de doelstelling kan soms de gemiddelde waarde, maar soms ook de karakteristieke waarde van belang zijn. De waarde wordt meestal bepaald aan de hand van veldwerk en het uitvoeren van proeven.

Grondeigenschappen

Dit zijn eigenschappen die op basis van ervaring en eerder onderzoek aan een bepaald type grond toegekend worden, bijvoorbeeld het toekennen van eigenschappen aan klei op basis van de NEN.

Ondergrondsegment

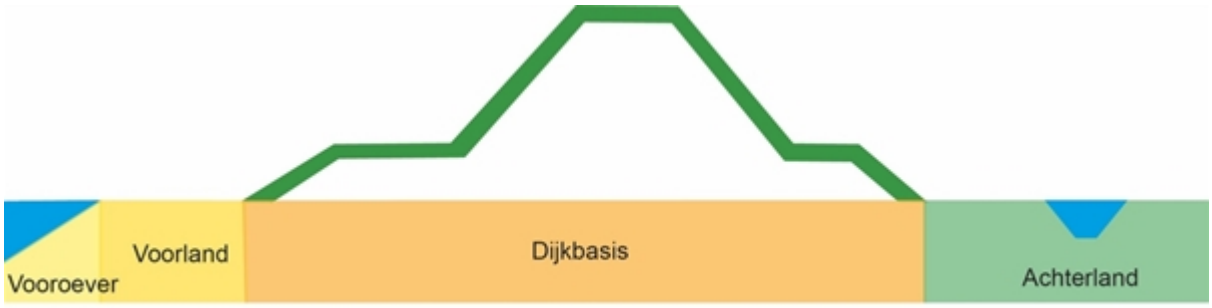
Bij lijnelementen zoals een dijk of een spoorlijn wordt de ondergrond soms opgedeeld in ondergrondsegmenten. Binnen een dergelijk segment wordt de variatie in geologische opbouw constant gesteld. Deze variatie wordt vaak beschreven met behulp van één of meer 1D-scenario's met een kans van aantreffen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Constructieve functies van de ondergrond

Bij een grondconstructie voor een waterkering maakt de ondergrond deel uit van die waterkering. Het is van belang dat de ondergrond de plaats- en vormvastheid van de dijk garandeert en tegelijkertijd zelf ook water keert. De ondergrond ondervindt net als de dijk belastingen door hoge waterstanden, stromingen en golven. Grondwaterstromingen en -spanningen verdienen hierdoor bijzondere aandacht.

In dit artikel worden de constructieve functies van de ondergrond toegelicht afhankelijk van de plaats ten opzichte van het dijklichaam, zie Figuur 1 [Technisch rapport waterkerende grondconstructies, 2001].



Figuur 1 Schematisatie van het dwarsprofiel.

Achterland

De ondergrond van het achterland kan bestaan uit slecht doorlatende klei- en veenlagen (deklaag) die op goed doorlatende zandlagen liggen. De sterkte en stabiliteit van een deklaag is van belang voor de stabiliteit van de binnenzijde van de dijk. Hoge waterstanden aan de buitenzijde van de dijk oefenen via het grondwater druk uit op het scheidingsvlak van de deklaag met de doorlatende zandlaag. Als deze grondwaterspanningen te hoog worden kan de deklaag opdrukken of opbarsten. Hierdoor kunnen de faalmechanismen afschuiven en piping geïnitieerd worden. De grondsamenstelling van de deklaag en de watervoerende laag zijn van belang voor het bepalen van de weerstand tegen opdrukken of opbarsten. De dikte en hoogteligging van de deklaag en het uittreepunt spelen ook een

rol.

Dijkbasis

De dijkbasis is de ondergrond onder de dijk en vormt het fundament van de waterkerende grondconstructie. De dijkbasis heeft drie hoofd-constructieve functies die afhankelijk zijn van de sterkte- en vervormingseigenschappen van de grondlagen in de dijkbasis.

1. Door aanleg van de dijk zal zetting van de dijkbasis optreden. De vervormingseigenschappen bepalen de mate waarin deze zettingen gelijkmatig verlopen zowel in lengte- als in dwarsrichting. De afdekkende slappe lagen zijn hiervoor bepalend.
2. De dijkbasis heeft een invloed op de stabiliteit van de dijkkern, taluds en bermen. De eigenschappen, van met name slappe lagen, beïnvloeden de stabiliteit en de mogelijke horizontale vervormingen. In het algemeen neemt de sterkte van slappe grondlagen na enige tijd toe door het aanbrengen van een boven belasting. Echter, tijdens en net na de uitvoeringsfase waarin de belasting wordt aangebracht, wordt de belasting door het poriewater gedragen. De verhoogde waterspanningen vormen een risico voor geotechnisch bezwijken van de grond. Dit kan worden voorkomen door de wateroverspanningen te dissiperen met een cunet of verticale drainage. Hiermee wordt de zetting versneld en wordt ook een grotere stabiliteit verkregen.
3. Als er sprake is van doorgaande watervoerende zandlagen, dan kan door grondwaterstroming terugschrijdende erosie (piping) en/of stabiliteitsverlies worden veroorzaakt.

Ook bij de sterkteberekeningen is het belang dat er rekening wordt gehouden met de effecten van hoge waterstanden op de waterspanningen. Hierdoor nemen de korrelspanningen af waardoor de schuifweerstand van de ondergrond verkleint. Verder kan het waterkerend vermogen ernstig worden bedreigd door faalmechanismen voortkomend uit ongelijkmatigheden in de ondergrond.

Voorland

De functies van het voorland vertonen overeenkomsten met die van het buitentalud en de buitenberm. Ten eerste dient in het voorland een degelijke overgangsconstructie aanwezig te zijn ter plaats van de aansluiting op het buitentalud. Deze constructie is tevens van belang voor opsluiting van harde bekleding op het buitentalud. Ten tweede beïnvloedt het voorland de mate van golfoploop en golfoverslag. Hiermee dient bij het bepalen van de kruinhoogte rekening te worden gehouden. Ten derde vervult het voorland een functie bij de buitenwaartse stabiliteit en bij piping. Voor de beoordeling hiervan zijn de samenstelling en eigenschappen van de ondergrond en de geometrie van het voorland van belang. Bij waterstandsverhogingen ontstaat over het voorland een verhang net als bij de dijkbasis vermeld is. Voor het weerstand biedend vermogen van de waterkering tegen piping is het intreepunt van belang: hoe dichter deze bij de dijk ligt, des te korter de kwelweglengte is. Een intreepunt richting dieper gelegen zandlagen kan, behalve via de rivierbodem zelf, bijvoorbeeld gelegen zijn in een nevengeul (strang) in de uiterwaarde. In het geval van een relatief dunne deklaag kan intrede ook plaatsvinden via sloten of scheuren in de deklaag.

Vooroever

De vooroever beïnvloedt net als het voorland de buitenwaartse stabiliteit. Hierbij is de geometrie van de vooroever van belang. Een steile vooroever met op korte afstand van de teen een diepe geul, of ontgrondingkuil, vereist aandacht voor de schuifsterkte bij het grondonderzoek en later bij de stabiliteitsberekeningen. Tevens is, zeker bij begrenzing van het buitentalud direct aan de rivier of geul, de teenconstructie en de stabiliteit daarvan van belang. In dergelijke gevallen wordt vrijwel altijd een stortstenen berm toegepast tot boven de waterlijn. Deze zogenaamde ‘plasberm’ of ‘kreukelberm’, is tevens van belang voor een goede overgang en opsluiting van de

buitentaludbekleding.
Een bijzondere vorm van instabiliteit is de zettingsvloeiing van de vooroever. Zettingsvloeiingen kunnen optreden in dikkere losgepakte zandlagen met een bepaalde korrelsamenstelling en is afhankelijk van de breedte van het voorland en de geulhelling en -diepte. Wanneer dit aan de orde is dan is dit een aspect om bij de tracékeuze rekening mee te houden. Tijdens zettingsvloeiingen vloeit zand uit het talud. Pas bij een zeer flauw talud (orde 1:20) stabiliseert zich dit pas weer. Indien een enigszins diepe geul aanwezig is, dan tast een zettingsvloeiing de stabiliteit van een onderwatertalud aan over een grote horizontale afstand (tientallen meters). Dit kan leiden tot ondermijning en zelfs falen van de waterkering.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Relatie grondlichaam en ondergrond met belastingen

In dit artikel wordt de invloed van de meest belangrijke belasting op de ondergrond en het grondlichaam beschreven. Verder wordt ook ingegaan over welk faalmechanisme de belasting kan veroorzaken en welke afmetingen en grondparameters de belastingen beïnvloeden.

Permanente belastingen

Eigen gewicht en gronddruk

Het eigen gewicht van het dijklichaam moet als een belasting worden gezien. Het aandrijvend moment in de analyse van de macrostabiliteit wordt in hoge mate door dit eigen gewicht bepaald. Het aandrijvend moment kan leiden tot afschuiven. Het eigen gewicht hangt af van het volumetrisch gewicht van de in het grondlichaam aanwezige materialen en ook van de mate van verzadiging van deze materialen. Het eigen gewicht en gronddruk kunnen leiden tot zettingen [Technisch rapport waterkerende grondconstructies, 2001].

Hydraulische belastingen

Waterspanningen

Een verhoogde waterstand, golven, grondwaterstroming en neerslag kunnen leiden tot infiltratie en een toename in waterspanningen. Hogere waterspanningen in ongedraineerde situaties leiden tot een verlaagde korrelspanningen en zorgen daarmee dus voor een minder sterke ondergrond. De afname van sterkte van de ondergrond kan leiden tot faalmechanismen zoals afschuiven, opbarsten/opdrijven en piping [Van der Meer, 2004].

Droogte

Bij uitdroging van klei ontstaan krimpscheuren en neemt de erosiebestendigheid van de klei af en kan water gemakkelijker infiltreren. In het geval van een dijk met een kern van veen kan droogte leiden tot krimp van het veen. Dit veroorzaakt zettingen en een afname van het gewicht van de dijk. Dit laatste leidt tot een afname van de weerstand tegen afschuiven [STOWA, 2018].

Golven

Golven kunnen de bekleding van het buitentalud beschadigen door golfklap en de golfoploop. Ook leidt golfoploop tot infiltratie van water in de dijk. Golfoverslag kan de bekleding van het binnentalud beschadigen. Ook leidt golfoverslag tot infiltratie van water in de dijk.

Overige variabele belastingen

Verkeer

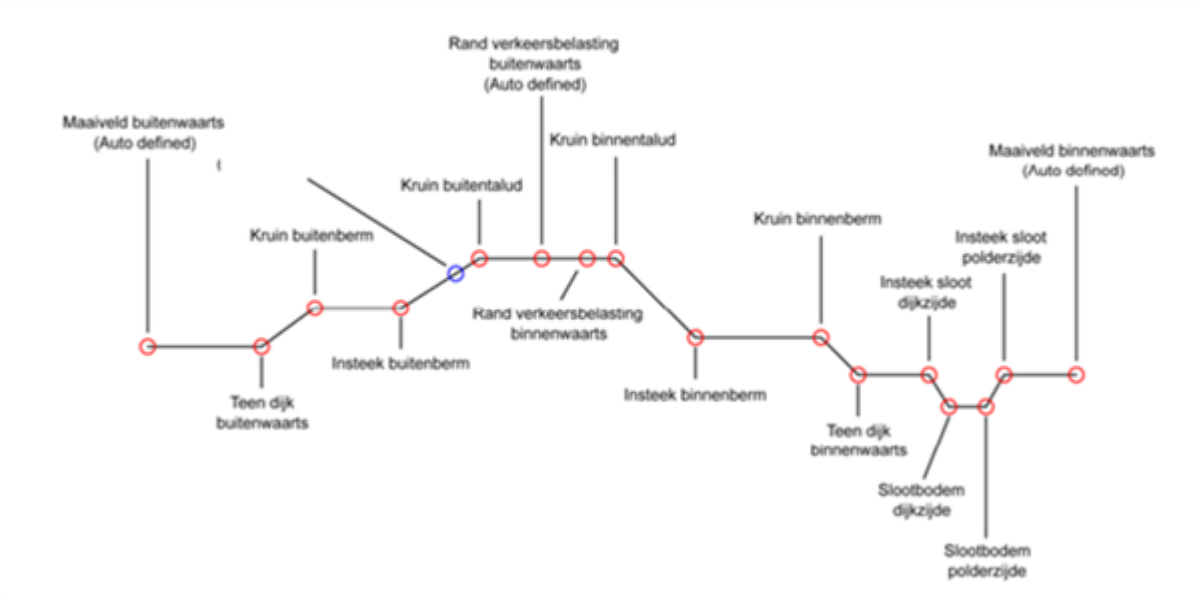
Verkeer zal voor een verticale belasting op het grondlichaam en de ondergrond zorgen. Dit kan leiden tot zettingen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Definitie hoogtegeometrie

Hoogtegeometrie dijkprofiel

De hoogtegeometrie is een belangrijk aspect van de kering voor verschillende mechanismen. Deze mechanismen worden nader toegelicht in het artikel Schematiseren hoogtegeometrie. De hoogtegeometrie kan geschematiseerd worden met verschillende karakteristieke punten. Deze punten en hun locaties in het dwarsprofiel zijn weergegeven in Figuur 1. De punten zijn onderdeel van de definitie van de hoogtegeometrie van de dijk.

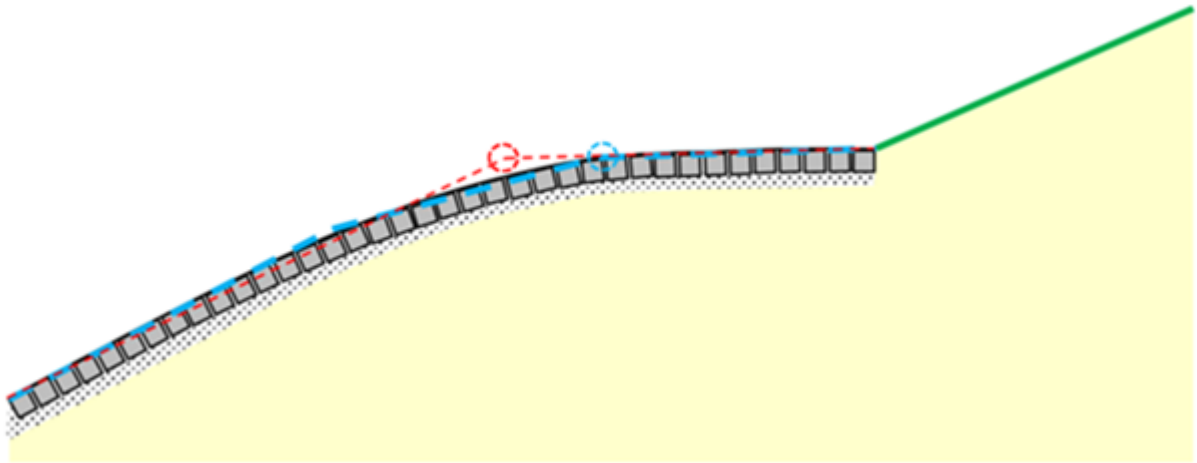


Figuur 1 Karakteristieke punten en hun locatie in een dwarsprofiel [Deltares, 2012].

In Figuur 1 is de buitenwaterzijde gelegen aan de linkerkant en de binnenwaartse zijde (polder, achterland) aan de rechterkant.

Afwegingen in keuze van (minder duidelijke) karakteristieke punten

In sommige gevallen komt een gekromde taludovergang voor (teen, berm, kruin, insteek sloot en dergelijke). Dit leidt tot een minder duidelijke keuze voor het karakteristieke punt. Het gekromde talud kan grof geschematiseerd worden met twee rechte lijnen, zoals de rode lijn in Figuur 2, of gedetailleerder met meerdere lijnen, zoals de blauwe lijn. De keuze voor het karakteristieke punt ‘Kruin buitenberm’ is in het figuur aangemerkt met een cirkel. Meer informatie over de schematisering van steenzettingen is te vinden in het artikel Schematisatie dijkprofiel steenzetting.



Figuur 2 Schematisering van een talud met tonrondte en afgeronde voorrand van de berm.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Schematiseren hoogtegeometrie

Inleiding

De schematisatie van de hoogtegeometrie is relevant voor de mechanismen dijkerosie (hoogte, overslag), geotechnische stabiliteit, voorland en piping. De relevante aspecten voor het schematiseren van de hoogtegeometrie zijn sterk mechanisme-afhankelijk. De manier waarop geschematiseerd wordt, hangt immers af van het model dat wordt toegepast en de invloed die de geometrie heeft op de uitkomst van de som. Zo is de aanwezigheid van een teensloot bijvoorbeeld van belang voor de mechanismen piping en macrostabiliteit binnenwaarts en niet zo zeer voor het afschuiven van bekleding.

Bij de schematisering van de hoogtegeometrie zijn de onderstaande stappen van belang:

1. Bepalen van de vakindeling voor hoogtegeometrie (omgaan met variaties).
2. Schematiseren van de hoogtegeometrie (maaiveld-, dijk, voorland, sloot, enzovoorts).
3. Schematiseren van de karakteristieke punten.

Deze aandachtspunten voor de hoogte schematisering zijn per initieel mechanisme uitgewerkt. Hierin is de afleiding van de hoogtegeometrie voor het betreffende mechanisme vastgelegd.

Dijkerosie (hoogte, overslag)

De afwegingen voor de keuze van het representatieve dwarsprofiel zijn weergegeven in [Handleiding overstromingskansanalyse dijken/dammen : Deel 3 Dijkerosie - buitentalud, 2023] . Hiervoor zijn per mechanisme (asfalt, steenzetting en erosie buitentalud) specifieke uitgangspunten opgenomen. De keuze voor het representatieve dwarsprofiel is weergegeven in [Handleiding overstromingskansanalyse dijken/dammen : Deel 4 Dijkerosie - kruin en binnentalud, 2023]. Daarnaast is de definitie van het dijkprofiel en het voorland toegelicht in het artikel Geometrie dijken, voorland en dammen. Daarnaast zijn er per mechanisme specifieke aandachtspunten gedefinieerd in de artikelen: Schematisatie dijkprofiel steenzetting, Schematisatie dijkprofiel asfaltbekleding, Schematisatie dijkprofiel grasbekleding en Controle van erosie kruin en binnentalud na een binnenwaartse afschuiving.

Geotechnische stabiliteit

De keuze voor het representatieve dwarsprofiel is weergegeven in [Handleiding

overstromingskansanalyse dijken/dammen : Deel 1 Geotechnische instabiliteit, 2023]. De definitie van het profiel, de karakteristieke punten en de keuze voor de representatieve profielen zijn toegelicht in het artikel Externe geometrie. De geometrie voor het mechanisme afschuiven voorland is toegelicht in Externe geometrie voor afschuiving voorland en de bijbehorende geometrie parameters zijn toegelicht in Geometrie-parameters voor de afschuiving van het voorland.

Piping

De keuze voor het representatieve dwarsprofiel en het in- en uittredepunt zijn toegelicht in [Handleiding overstromingskansanalyse dijken/dammen : Deel 2 Piping, 2023]. Relevante aandachtspunten voor het schematiseren van de piping som zijn afhankelijk van het model en het deelmechanisme.

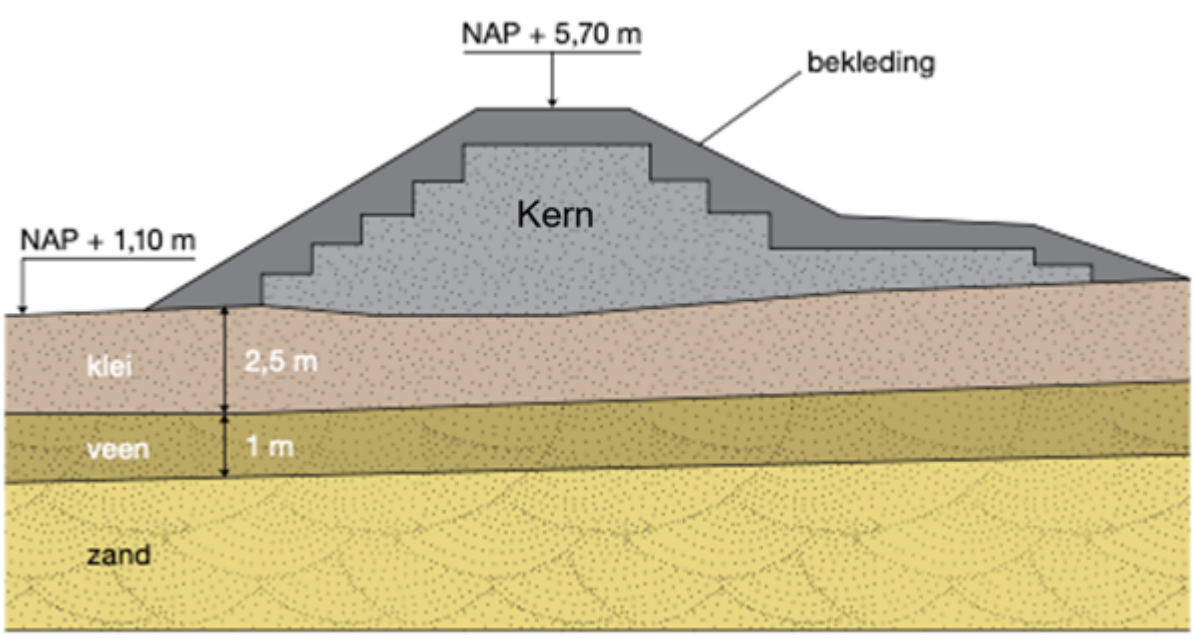
Versie 1.0: 2 juli 2025

2. Karakteriseren van dijklichaam en ondergrond

2.1 Opbouw dijklichaam

Opbouw dijklichaam

Een dijk bestaat uit een dijkkern met daarom heen een kleibekleding (Figuur 1). In Nederland hebben dijken vrijwel altijd een lange historie en ze zijn in de loop der tijd steeds hoger en breder geworden. In veel gevallen bestaat een dijk daarom uit een opeenstapeling van verschillende bouwfasen. Afgezien van versterkingen die de laatste 30-50 jaar zijn uitgevoerd, is het vaak lastig om ontwerptekeningen van eerdere bouwfasen te achterhalen. De exacte opbouw van de kern van een dijk is daarom meestal niet goed bekend, dit geldt met name voor de dieper gelegen delen van de kern. Voor sommige faalmechanismes kan het relevant zijn om te variëren met de opbouw van de dijkkern, zodat begrip ontstaat in de mogelijke impact van een andere dijkkernopbouw op de overstromingskans. Mocht deze impact groot zijn, dan kan het nodig zijn om aanvullend grondonderzoek uit te voeren.



Figuur 1 Voorbeeld opbouw van het dijklichaam en de ondergrond [Technisch rapport, 2012].

Voor recente versterkingen kan aangenomen worden dat de nieuwe kern uit zand bestaat. Klei heeft, afhankelijk van de samenstelling, een goede erosiebestendigheid en vormvastheid. Deze

eigenschappen komen vooral tot uiting bij steile taluds en als er water tegen het talud staat. Ook de relatief geringe doorlatendheid van het materiaal speelt een belangrijke rol bij de keuze om klei in de dijkenbouw toe te passen. Klei wordt vaak toegepast in de dijkkern, als bekleding op de dijk of als kleikist. De verwerkbaarheid van klei is in zijn algemeenheid sterk afhankelijk van het watergehalte en consistentie-index. Meer informatie over de kwaliteit en verdichting van klei is te vinden in de artikelen Erosiegevoeligheid-bestendigheid en Verwerking van grondmaterialen tijdens uitvoering. De kleibekleding kan over relatief korte afstanden (<100 m) variëren in dikte en type klei. Dit kan onderzocht worden middels grondonderzoek en het graven van proefkuilen. Er wordt momenteel veel onderzoek gedaan naar de impact van deze variatie op dijkveiligheid, Onderzoek Erodeerbaarheid Klei.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.2 Opbouw ondergrond

Geologische beschrijving van de ondergrond

Kader

Dit artikel geeft achtergrondinformatie bij het opstellen van schematisaties van de ondergrond. Het gaat in op de ontstaansgeschiedenis van de Nederlandse ondergrond. Dit is van belang omdat het gedrag van grondlagen afhangt van het afzettingsmilieu en de omstandigheden na afzetting.

Doel geologische gebiedsbeschrijving

Het doel van de geologische gebiedsbeschrijving is het maken van een inschatting van:

- De geohydrologische situatie, met name te verwachten stijghoogtes van het grondwater in watervoerende pakketten tijdens hoogwater.
- De voor het ontwerp van belang zijnde faalmechanismen.
- Het geohydrologische en geotechnische invloedsgebied van grondconstructies (breedte en diepte).
- De benodigde waterspanningsmetingen en grondonderzoek.

Op grond van geologische kennis en ervaring in het gebied wordt beoordeeld binnen welke geologische formaties mogelijk nog geulen, laagonderbrekingen etc. kunnen voorkomen, die met de beschikbare gegevens nog niet met voldoende betrouwbaarheid kunnen worden uitgesloten. Waar dit voor het ontwerp van belang is, kan dit in veel gevallen al in een vroeg stadium met stadium met geologisch, geotechnisch of geofysisch onderzoek worden geverifieerd.

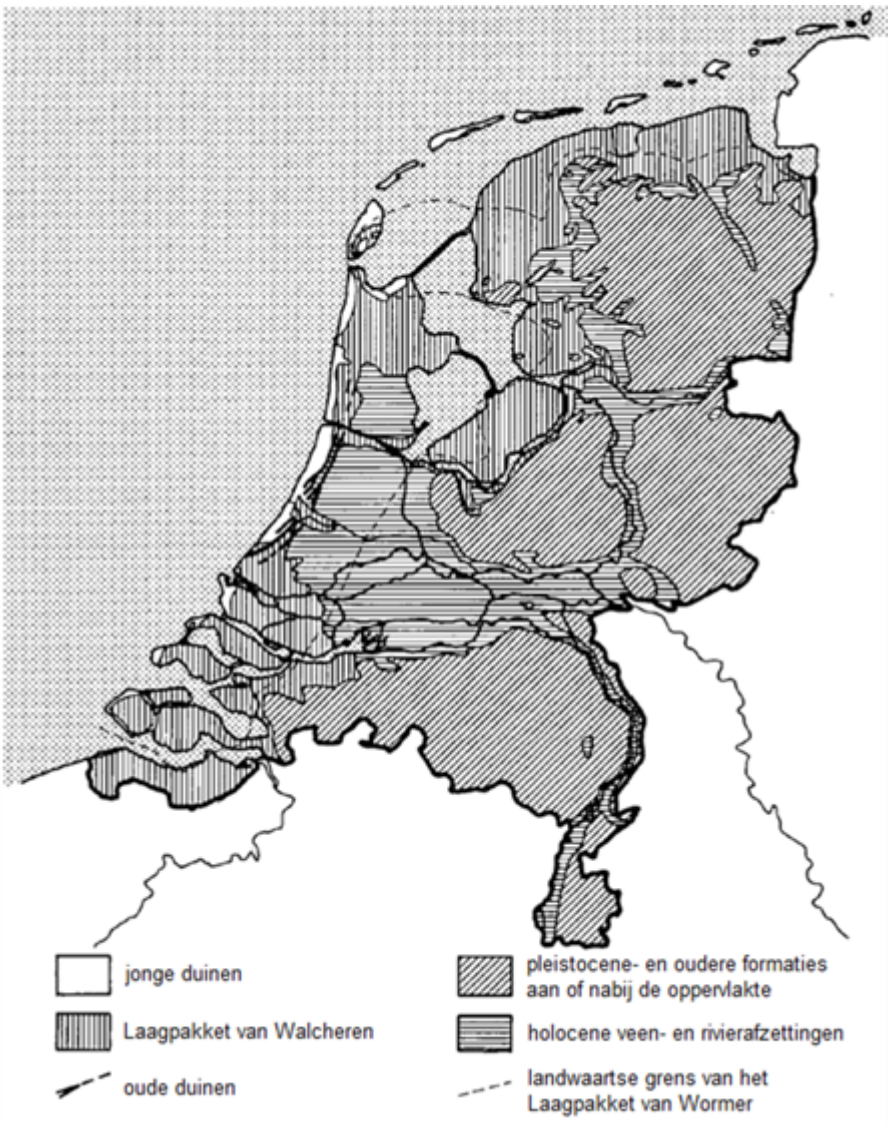
Van belang is, dat de geologische gebiedsbeschrijving een voldoende betrouwbaar beeld van de ondergrond schetst, om bij bovenstaande inschattingen geen fundamentele vergissingen te maken. Een vergissing met mogelijk grote gevolgen vormt het missen van een watervoerende geul in de ondergrond of een oude rivierduin (donk).

De indeling van de ondergrond in verschillende lagen gebeurt op grond van de lithostratigrafie, dat wil zeggen op grond van de samenstelling van de lagen en de volgorde waarin ze zijn afgezet, en op grond van hun geotechnische eigenschappen, zoals bijvoorbeeld conusweerstanden en volumiek gewicht. Deze indeling geeft lagen die constant zijn in hun geotechnische eigenschappen, zodat ze rechtstreeks als geometrisch model kunnen worden gebruikt, bijvoorbeeld voor zettingsberekeningen en stabiliteitsonderzoek.

Geologie bovenrivierengebied

Nederland vormt het randgebied van een dalend bekken, het Noordzeebekken, dat in het Pleistoceen

en Holoceen door sedimentatie is opgevuld. Deze voornamelijk fluviatiele sedimenten werden door de Rijn en de Maas aangevoerd. Tijdens de laatste twee ijstijden (Weichselien en Saalien) was het Noordzeebekken reeds grotendeels opgevuld, en doordat veel oppervlaktewater in gletsjers werd vastgelegd viel de Noordzee droog. Tijdelijk was er zelfs sprake van een poolwoestijn.
Een groot deel van de bovenkant van het Pleistoceen bestaat uit fluviatiele sedimenten, en buiten de vroegere rivierdalen uit dekzand dat tijdens de laatste ijstijd door de wind werd aangevoerd. Een algemeen beeld van de ligging van de rivierdalen is te zien in de geologische overzichtskaart van figuur 1. De dekzandgebieden bevinden zich aan weerszijden van de rivierdalen. Ze liggen in het algemeen bedekt onder de holocene afzettingen, behalve in de oostelijke en zuidoostelijke provincies, waar ze plaatselijk aan de oppervlakte zijn gebleven.



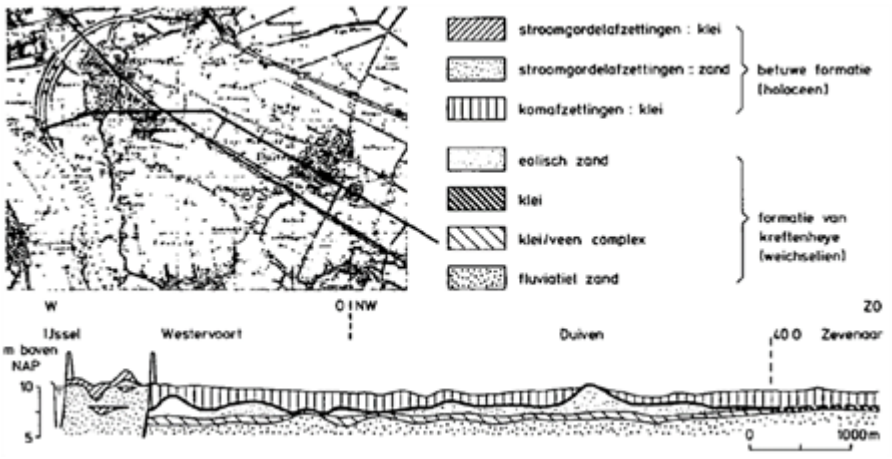
Figuur 1 Geologische overzichtskaart Nederland (Bewerking van kaart uit Mededelingen Rijks Geologische Dienst, Nieuwe serie nr. 21)

Aan het eind van het Weichselien, ongeveer 11.700 jaar geleden, begon de temperatuur geleidelijk te stijgen en startte het Holoceen. De temperatuurstijging zorgde wereldwijd voor een snelle zeespiegelstijging en de Noordzee begon weer vol te lopen.

Gedurende het Holoceen hebben de grote rivieren een grote verscheidenheid aan sediment afgezet. Naar de ontstaanswijze maakt men onderscheid in stroomgordel-, oever- en komafzettingen. De

eerste zijn afgezet in het gebied waar de rivier actief gestroomd heeft: de meandergordel waar de rivierlopen zich voortdurend verleggen. Bochten werden afgesneden en nieuwe lopen ontstonden. De oeverafzettingen grenzen aan de stroomgordelafzettingen; zij zijn afgezet in de zone waar het water wanneer de rivier buiten zijn oevers trad, nog voldoende kracht had om zand mee te voeren, en vervolgens bij dalende stroomsnelheden weer af te zetten. Zij vormen de overgang tussen de stroomgordel- en komafzettingen, die daar ontstaan zijn, waar het stromende water bij hoge waterstanden tot rust kwam, zodat het slib bezonk. De komafzettingen bestaan voornamelijk uit klei. Plaatselijk komt aan de basis van de komklei veen of venige klei voor.
Ter illustratie is in figuur 2 een dwarsprofiel gegeven van het Komgebied van de Westelijke Liemers.

Uit het geschetste geologische beeld blijkt dat de Holocene afzettingen in de stroomdalen regelmatig doorsneden en onderbroken worden door verzande of dichtgeslibde riviergeulen van Holocene ouderdom, waardoor de geologische opbouw en de samenstelling van de ondergrond van het rivierengebied van plaats tot plaats sterk kunnen verschillen.



Figuur 2 Dwarsprofiel van het Komgebied van de Westelijke Liemers (Ontleend aan de Geologische kaart van Nederland 1 :50.000, kaartblad Arnhem Oost (40 O) van de Rijks Geologische Dienst)

Geologie benedenrivierengebied

De geologische geschiedenis van het gebied in kwestie en de opbouw van de qua samenstelling en geotechnische eigenschappen verschillende grondlagen is in tientallen publicaties reeds uitgebreid behandeld. Hier wordt slechts de geologische informatie verschaft die van belang kan zijn bij de analyse van de te verwachten grondlagen en de interpretatie van het grondonderzoek nabij dijklichamen. Voor nadere informatie wordt verwezen naar de literatuur, en naar geologische, geomorfologische, bodemkundige en geohydrologische kaarten.

In het gebied van de benedenrivieren zijn met name vier geologische eenheden van belang: de pleistocene Formatie van Kreftenheye en de holocene Formatie van Naaldwijk, Formatie van Echteld en Formatie van Nieuwkoop.

Pleistoceen

De afzettingen die in het late Pleistoceen zijn gevormd, zijn:

1. Fluviatiele afzettingen: Formatie van Kreftenheye.
   De fluviatiele afzettingen, die het hoofdelement van deze pleistocene formatie vormen, zijn afgezet door de rivieren. Ze komen in heel het gebied voor. De top van deze pleistocene afzettingen ligt tussen N.A.P. -10 en -23 m. De afzettingen bestaan hoofdzakelijk uit middel- tot grofkorrelige zanden, plaatselijk vermengd met grind. Aan de bovenzijde worden deze rivierafzettingen steeds fijner, en bovenaan worden ze meestal afgesloten met een enkele

decimeters dikke siltige en fijnzandige klei- of leemlaag (Laag van Wijchen).

2. Eolische afzettingen: Laagpakket van Delwijnen (Formatie van Kreftenheye). De eolische, door de wind afgezette zanden vormen onder andere rivierduinen, de zogenaamde donken. Het zand is fijn tot middelkorrelig en afkomstig van het destijds droogliggende rivierbed. De donken zijn gelijktijdig met of vlak na de afsluitende fluviatiele kleilaag afgezet. Ze liggen onregelmatig over het hele gebied verspreid en variëren sterk in dikte, van enkele decimeters tot 5 à 10 meter. Plaatselijk kunnen ze reiken tot aan het maaiveld.
3. Laagpakket van Delwijnen (Formatie van Kreftenheye)
   De eolische, door de wind afgezette zanden vormen onder andere rivierduinen, de zogenaamde donken. Het zand is fijn tot middelkorrelig en afkomstig van het destijds droogliggende rivierbed. De donken zijn gelijktijdig met of vlak na de afsluitende fluviatiele kleilaag afgezet. Ze liggen onregelmatig over het hele gebied verspreid en variëren sterk in dikte, van enkele decimeters tot 5 à 10 meter. Plaatselijk kunnen ze reiken tot aan het maaiveld.

Holoceen

De relevante afzettingen die in het Holoceen zijn gevormd, zijn:

1. Fluviatiele afzettingen: Formatie van Echteld

Aan de oostgrens van het benedenrivierengebied bevinden zich rivierafzettingen aan het oppervlak, meer naar het westen komen deze steeds dieper onder de getijdenafzettingen te liggen. De Formatie van Echteld bestaat uit komafzettingen (siltige klei en venige klei), oeverafzettingen (siltige tot zandige klei) en geulafzettingen (zand).

2. Duin- en Strandafzettingen: Laagpakketten van Schoorl en Zandvoort (Formatie van Naaldwijk)

De Duin- en Strandafzettingen bestaan uit fijn- tot middel korrelige zanden. Duinzanden zijn tot duinen opgewaaid strandzand dat direct nabij de zee is afgezet. De genoemde afzettingen komen alleen in het Westen voor, dicht bij de kust.

3. Getijdenafzettingen: Laagpakketten van Wormer en Walcheren (Formatie van Naaldwijk)

In het benedenrivierengebied zijn deze grotendeels afgezet in getijdenbekkens. Het oudere en dieper gelegen laagpakket van Wormer wordt van het laagpakket van Walcheren gescheiden door het Hollandveen. Van het Laagpakket van Wormer bestaat het onderste deel veelal uit zand, en het bovenste deel meestal uit klei. Het Laagpakket van Walcheren bestaan in de geulen meestal uit zand of zandige klei, en buiten de geulsystemen voornamelijk uit klei.

4. Organische afzettingen: Basisveen Laag en Hollandveen Laagpakket (Formatie van Nieuwkoop)

In de Formatie van Nieuwkoop worden een tweetal veenlagen onderscheiden: het Basisveen en het Hollandveen. De Basisveen Laag ontstond onder invloed van de stijgende grondwaterspiegels als gevolg van de stijgende zeespiegel. De laag ligt aan de basis van de Holocene afzettingen, vaak op de Laag van Wijchen in dit deel van Nederland, en bestaat vooral uit eutroof tot mesotroof bos- en rietzeggeveen. Het Hollandveen Laagpakket ontstond vanaf circa 7.500-6.500 jaar geleden, achter een steeds meer gesloten kustlijn en met steeds lagere snelheden van zeespiegelstijging. Veenvorming vond op veel plaatsen voor duizenden jaren plaats en er ontstond een metersdik pakket. Door latere bedekking met het Laagpakket van Walcheren en het ontginnen van het landschap is de dikte sterk afgenomen. In verschillende droogmakerijen is het veen afgegraven. Het Hollandveen kan zowel uit

eutroof bos- en rietveen bestaan als uit oligotroof mosveen.

Geologie kustgebied

Het kustgebied van Nederland is in drie fysisch geografische regio's in te delen; het zuidwestelijk zeekleigebied, het duingebied en het Fries-Gronings zeekleigebied. In deze drie regio's zijn twee geologische eenheden van belang: de Pleistocene Formatie van Boxtel (Laagpakket van Wierden) en de Holocene Formatie van Naaldwijk.

Pleistoceen

De Pleistocene tijd wordt gekarakteriseerd door een afwisseling van koude (glaciale) en warme (interglacialen) klimaten. De laatste koude periode voorafgaand aan het Holoceen wordt Weichselien genoemd. Gedurende deze periode is de Formatie van Boxtel afgezet. In deze periode lag er geen landijs in Nederland, het was wel zo koud dat de ondergrond een groot gedeelte van het jaar bevroren was. Nederland was bedekt met een zogenaamde toendra vegetatie, bestaande uit enkele lage struiken en grassen. Deze begroeiing geeft slechts weinig bescherming tegen het wegblazen en elders weer afzetten van zand door de wind. Over heel Nederland (uitgezonderd in het rivierengebied) werd een dunne bedekking van eolisch zand afgezet, vandaar de naam dekzand waaronder het Laagpakket van Wierden ook wel bekend staat.

De eolische, door de wind afgezette zanden zijn fijn tot middelkorrelig, waarin lokaal leemlaagjes en grindsnoertjes kunnen voorkomen. Verschijnselen ten gevolge van vorstwerking komen veelvuldig voor. De dekzanden liggen als een deken over het hele gebied verspreid en variëren sterk in dikte, van een enkele meter tot circa 10 meter.

Holoceen: het zuidwestelijke zeekleigebied

Het zuidwestelijk zeekleigebied wijkt naar erosie- en sedimentatiepatroon sterk af van het Fries-Gronings zeekleigebied en het duinengebied. Een belangrijke oorzaak is het voorkomen van grote riviermondingen. Daarnaast is het aanwezige getijdenverschil in Zuidwest Nederland groter door stuwing van de vloedstroom in het nauw van Calais.

In het zuidwestelijk zeekleigebied bevinden zich vier afzettingstypen met ieder een eigen lithologie, te weten:

1. Duin- en strandafzettingen.
   Voor een beschrijving wordt verwezen naar de beschrijving van de duin- en strandafzettingen behorende tot de Formatie van Naaldwijk bij benedenrivieren. Voor het zuidwestelijk zeekleigebied geldt dat de genoemde afzettingen alleen dicht bij de kust voorkomen.
2. Mariene afzettingen.
   Voor een beschrijving wordt verwezen naar de beschrijving van de mariene afzettingen behorende tot de Formatie van Naaldwijk bij benedenrivieren. Voor het zuidwestelijk zeekleigebied geldt dat het Laagpakket van Walcheren plaatselijk als plaatafzetting is ontwikkeld.
3. Fluviatiele afzettingen.
   De fluviatiele afzettingen aan de oostkant van het zuidwestelijk zeekleigebied behoren tot de Formatie van Echteld. Dit zijn rivierafzettingen die onder invloed van de zeespiegelstijging zijn afgezet. In het zuidwestelijk zeeklei gebied worden afzettingen aangetroffen, die bestaan uit klei met dunne laagjes veen. De dikte van deze afzettingen varieert tussen de 1 en 2 meter.
4. Organische afzettingen.
   Voor een beschrijving wordt verwezen naar de beschrijving van de organische afzettingen behorende tot de Formatie van Nieuwkoop bij benedenrivieren.

Holoceen: het duinengebied

Het duingebied omvat de kuststrook ten westen van de lijn Groet-Alkmaar-Velsen-Haarlem-Leiden-Voorburg-Monster. Het duingebied kan worden ingedeeld in twee morfogenetische eenheden, namelijk de jonge- en oude duinen. Tijdens het begin van het Holoceen werden voor de kust strandwallen gevormd. Plaatselijk werd het strandwallencomplex door riviermondingen doorbroken. Op de strandwallen werden de oude duinen gevormd. De jonge duinen zijn in de vroege middeleeuwen gevormd. Tussen de strandwallen zijn mariene sedimenten afgezet en kon zich veen ontwikkelen. De Formatie van Naaldwijk omvat in het duinengebied drie afzettingstypen met ieder een eigen lithologie, te weten:

1. Duin- en strandafzettingen.
2. Mariene afzettingen.
3. Organische afzettingen.

In aanvulling daarop. Het Laagpakket van Walcheren bestaat in het duingebied hoofdzakelijk uit een kleibedekking van 1 tot enkele meters. Alleen op de plaatsen waar het strandwallencomplex door riviermonden werden doorbroken, kunnen zanden van het Laagpakket van Walcheren voorkomen. Voor de Formatie van Nieuwkoop in het duinengebied geldt dat de dikte van het basisveen maximaal 1 meter bedraagt.

Holoceen: het Fries-Groningse zeekleigebied

In het Fries-Gronings zeekleigebied ligt het Pleistoceen vrij ondiep en duikt naar het noorden weg. Op de Pleistocene ondergrond is tijdens het Holoceen een pakket mariene afzettingen afgezet en hebben zich kustvenen gevormd.

De Formatie van Naaldwijk omvat in het Fries-Gronings zeekleigebied twee afzettingstypen met ieder een eigen lithologie, te weten de mariene afzettingen en de organische afzettingen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Klei

Definitie

De term klei wordt gebruikt voor cohesieve grondsoorten die, afhankelijk van de samenstelling en het watergehalte, in meer of mindere mate plastisch kunnen zijn en in droge vorm soms erg hard.

Klei als mineraal (anorganisch) betreft de fractie van deeltjes kleiner dan 2 µm, dit wordt ook wel aangeduid als lutum.

Klei als grond bestaat voor een belangrijk deel uit fijne deeltjes, ofwel een samenstelling van lutum, silt en zand. Klei als grondsoort wordt geclassificeerd conform NEN-EN 14668 [NEN, 2020]. Klei kan ook een (groot) aandeel organisch materiaal bevatten, maar bevat minimaal 8% lutum.

Klei komt vaak voor in Holocene lagen. In Midden-Nederland afgezet door de grote rivieren en in de kustprovincies gevormd in de kuststrook, getijdengebieden en kustmoerassen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Veen

Definitie

De term veen wordt gebruikt voor lagen in de ondergrond die voornamelijk uit plantenresten bestaan. Deze lagen vormen zich wanneer de afbraaksnelheid van organisch materiaal langzamer gaat dan de

productie van dit materiaal. Dit doet zich voor onder natte omstandigheden. Deze lagen zijn herkenbaar aan hun bruine kleur en het voorkomen van plantenresten. Het percentage organische stof ligt hoger dan 15% en het percentage lutum ligt lager dan 70%.
Veen komt veel voor in Nederland en veel dijken zijn gebouwd of veen, of bestaan zelf uit veen. Voor nadere beschrijvingen van veen kan gebruik worden gemaakt van het rapport Dijken op veen II [Erkens, G. et al, 2013].

Veen in Nederland

Veen komt in Nederland als dikke lagen aan de oppervlakte voor, alsook in pakketten afgewisseld met klei en zand. Dit wordt aangeduid als Hollandveen. In onderstaande figuur zijn de belangrijkste gebieden in Nederland weergegeven waar veen aan de oppervlakte voorkomt.

Daarnaast wordt aan de basis van de Holocene afzettingen vaak een dunne laag 'basisveen' of 'veen op grote diepte' aangetroffen, het zogenaamde Basisveen.

Hollandveen en Basisveen worden gerekend tot de Formatie van Nieuwkoop, zie ook Geologische beschrijving ondergrond.



Figuur Veengebieden in Nederland tot mv -1,2 m (bron: bodemkaart van Nederland)

Basisveen

Er wordt aangenomen dat dit veen meegroeide met de waterspiegel rijzing vanaf het begin van het

Holoceen, circa 10.000 jaar geleden. Aanvankelijk was er sprake van moerassen met open, zoet tot brak water waarin het veen zich ontwikkelde als beschreven in Ontstaan van Veen.
Na de vorming van het Basisveen is klei en/of zand afgezet bovenop het gevormde veen, waardoor het veen is gecomprimeerd tot maximaal circa 1/10 van de oorspronkelijke dikte van de laag.

Basisveen komt voor in het westen van Nederland, bovenop het Pleistocene zand, aan de basis van het Holoceen. De laagdikte is vaak niet groter dan circa 10 à 60 cm.

Hollandveen

Vanaf omstreeks 1800 vóór Christus begon zich opnieuw veen te vormen. Na de mesotrofe fase (artikel Ontstaan van veen) was de verdere ontwikkeling van het veen afhankelijk van neerslag (oligotrofe fase). De fasering zoals beschreven in Ontstaan van veen is dan ook niet overal in deze volgorde terug te vinden.

Hollandveen komt voor in het westen (Zuid-Holland, Noord-Holland en Utrecht), bovenop de fluviatiele afzettingen van de Formatie van Echteld of de mariene afzettingen van het Laagpakket van Wormer en noorden (Friesland, Overijssel en de veenkoloniën) van Nederland.

In iedere fase wordt de veenvorming in West Nederland sterk beïnvloed door de aanwezigheid van enkele rivieren (Oude Rijn, Oude IJssel) die anorganisch materiaal uit het achterland meevoeren en afzetten. Deze rivieren maken deel uit van de Rijn/Maas-delta. De laaggelegen gebieden achter natuurlijk gevormde oeverwallen vormen een goede ondergrond voor bosbegroeiing. Doordat deze gebieden regelmatig onderlopen is er sprake van een voedselrijke (eutrofe) situatie, waardoor de bosveenafzetting een hoog asgehalte heeft. Op enige afstand van de rivier wordt de toevoer van voedingsstoffen bepaald door de hoeveelheid neerslag. Bosveen van mesotrofe afkomst wordt aangetroffen langs de oevers van beken en rivieren die hun oorsprong hebben in het veengebied, zoals de Amstel en de Holendrecht. Rond 1200 na Christus was een groot gedeelte van West Nederland bedekt met lagen mosveen tot een dikte van 6 m. Tegenwoordig komt mosveen uitsluitend voor langs polderkaden, welke zijn overgebleven na de winning van veen voor brandstof. Mosveen was zeer geschikt als brandstof vanwege het lage asgehalte; op sommige plaatsen werd ook het zeggeveen afgegraven. De dikte van de veenlaag is, behalve door afgraving, afgenomen als gevolg van bemaling, in eerste instantie door windmolens, waardoor verdichting en verwering optrad. Over het algemeen is de dikte van het resterende zeggeveen en bosveen circa 5 m.

Nadat door menselijk ingrijpen de waterhuishouding werd beheerst, is aan het proces van veenvorming op de meeste plaatsen een eind gekomen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Silt (leem)

Definitie

De term silt (of leem) wordt gebruikt voor fijne grondsoorten (fijner dan zand), die weinig cohesief zijn en in contact met water zullen dispergeren (uiteenvallen). Het hoofdbestanddeel bestaat uit quartz.

Silt als mineraal (anorganisch) betreft de fractie van minerale deeltjes groter dan 2 µm en kleiner dan 63 µm.

Silt als grondsoort wordt geclassificeerd conform NEN-EN 14668 [NEN, 2020] en bestaat in het algemeen uit een mengsel van silt, lutum en zand, maar kan ook (een klein aandeel) organisch materiaal bevatten. Grondsoorten met deze eigenschappen komen in Nederland ook voor onder de benamingen leem en/of löss.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Zand

Definitie

De term zand wordt gebruikt voor niet cohesieve, loskorrelige grondsoorten bestaande uit korreldeeltjes van met name quartz (siliciumoxide).

Zand als mineraal betreft de fractie van deeltjes groter dan 63 µm en kleiner dan 2 mm.

Zand als grond bestaat voor een groot deel uit relatief grote korrels. Meestal is zand een mengsel van zand, silt en lutum, maar kan ook grind (korrels > 2 mm) bevatten en/of een (klein) aandeel organisch materiaal. Zand als grondsoort wordt geclassificeerd conform NEN-EN-14668 [NEN, 2020]. Zandkorrels kunnen in meer of mindere mate hoekig dan wel afgerond zijn. Daarnaast kan er, afhankelijk van de korrelverdeling, sprake zijn van meer of minder uniform gegradeerd zand.

Zand komt in Nederland voor in de Pleistocene laag (vaste zandlaag waarop gefundeerd wordt). Deze diepere Pleistocene lagen (afzettingen) vormen tevens het eerste watervoerende pakket. In Oost- en Zuid-Nederland komen deze (Pleistocene) lagen vaak aan het maaiveld voor. Zand is ook in het Holoceen afgezet, met name door rivier- en getijdengeulen.

Korrelverdeling/gradatie

Zand kan worden ingedeeld in drie verschillende gradaties. Namelijk: grof, middelgrof en fijn, zie Tabel 1. Dit is voor de classificatie van belang.

Tabel 1 Korrelgroottefracties conform NEN-EN 14688+1+2.

Categorie	**Korrelgroottefracties (afkorting)**	Korrelgroottebereik (mm)
Zeer grove grond	Blokken (Lbo)	> 630
Zeer grove grond	Keien (Bo)	> 200 tot ≤ 630
Zeer grove grond	Keitjes (Co)	> 63 tot ≤ 200
Grove grond	Grind (Gr)	> 2,0 tot ≤ 63
Grove grond	• Grof grind (cGr)	> 20 tot ≤ 63
Grove grond	• Middelgrof grind (mGr)	> 6,3 tot ≤ 20
Grove grond	• Fijn grind (fGr)	> 2,0 tot ≤ 6,3

Grove grond	Zand (Sa)	> 0,063 tot ≤ 2,0
Grove grond	• Grofkorrelig zand (cSa)	> 0,63 tot ≤ 2,0
Grove grond	• Middelgrofkorrelig zand (mSa)	> 0,2 tot ≤ 0,63
Grove grond	• Fijnkorrelig zand (fSa)	> 0,063 tot ≤ 0,2
Fijne grond	Silt (Si)	> 0,002 tot ≤ 0,0063
Fijne grond	• Grof silt (cSi)	> 0,02 tot ≤ 0,063
Fijne grond	• Middelgrof silt (fSi)	> 0,0063 tot ≤ 0,02
Fijne grond	• Fijn silt (fSi)	> 0,002 tot ≤ 0,0063
Fijne grond	Klei (Cl)	≤ 0,002

Toepassing van zand in dijken

Zand bij dijken wordt vaak gebruikt als materiaal in de kern of als binnendijkse aanvullingen, met name ook in (stabiliteits)bermen. Reden hiervoor zijn zaken als kosten, sterkte (hoge schuifweerstand) verwerkbaarheid en drainagemogelijkheden.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.3 Bepalen van grondeigenschappen

Bepalen van grondeigenschappen

Met grondeigenschappen worden hier de parameters bedoeld waarmee de geotechnische eigenschappen (of toestand) van de ondergrond worden gekarakteriseerd die gebruikt worden in een analyse van een faalmechanisme.

De grondeigenschappen kunnen worden gebaseerd op:

- Aannamen, gekoppeld aan een classificatie van de betreffende grondlaag, bijvoorbeeld het afzettingsmilieu. Deze aannamen kennen meestal een flinke onzekerheid.
- Metingen in het veld of op in het veld genomen monsters die worden beproefd in het laboratorium.

In dit artikel wordt ingegaan op het grondonderzoek gericht op het bepalen van grondeigenschappen.

Aanwijzingen hoe te komen tot een geschikte ondergrondschematisatie zijn opgenomen in het artikel Schematiseren van de ondergrond. Methoden om waterspanningen en stijghoogten te meten en de metingen te analyseren worden beschreven in de volgende artikelen: Instrumenten om waterspanningen te meten, Lekfactor of leklengte, Interpretatie van peilbuiswaarnemingen bij het onderstromen van hoog voorland en Modellen van het stijghoogteverloop in een zandlaag onder een ondoorlatende dijk.
Er bestaan geen eenduidige recepten voor het opzetten van grondonderzoek en de benodigde dichtheid van grondonderzoekpunten. De hoeveelheid grondonderzoek volgt uit de onzekerheden in de schematisatie van de ondergrond die nog bestaan na inventarisatie van de beschikbare gegevens. Verzamelen van ondergrondgegevens, al dan niet uit grondonderzoek en het op basis van die gegevens schematiseren is een iteratief proces. Uit een eerste gegevensinventarisatie/grondonderzoek volgen indicatieve schematiseringen en tevens de onzekerheden in die schematiseringen. Het reduceren van die onzekerheden kan via gericht extra grondonderzoek. Of dit zinvol is, zie ook Basisopzet van grondonderzoek, hangt mede af van het (verwachte) effect van deze onzekerheden in de faalmechanisme-analyses.

De uitvoering en interpretatie van diverse relevante proeven om sterkteparameters te bepalen, is beschreven in de artikelen Hoek van inwendige wrijving bepalen uit metingen en Voorbeelden bepalen normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S. Hoe uit sonderingen verschillende grondeigenschappen kunnen worden afgeleid wordt behandeld in Indicatie doorlatendheid uit waterspanningssonderingen en Ongedraineerde sterkte bepalen uit correlaties met sonderingen. Benodigde testen voor het bepalen van schuifsterkteparameters worden behandeld in het artikel Grondgedrag en rol van in situ toestand.

Voor wat de schuifsterkteparameters betreft kan een eerste beoordeling worden uitgevoerd op basis van de default-waarden die worden genoemd in het artikel Hoek van inwendige wrijving voor de gedraineerde sterkte en voor de ongedraineerde sterkte: stap 1 als genoemd in Stapsgewijs bepalen ongedraineerde schuifsterkteparameters. Wanneer de veiligheidsanalyse uitgaande van standaardwaarden leidt tot een te hoge overstromingskans, kan aanvullend veld- en laboratoriumonderzoek worden ingezet om de grondmechanische parameters te optimaliseren. Deze stapsgewijze aanpak is voor de ongedraineerde sterkte nader uitgewerkt in Stapsgewijs bepalen ongedraineerde schuifsterkteparameters.

Opgemerkt moet worden dat grondeigenschappen in de tijd als gevolg van diverse processen kunnen veranderen. Denk bijvoorbeeld aan rijping, kruip, samendrukking, veroudering, horizontale opspanning, veranderende waterspanningen e.d.

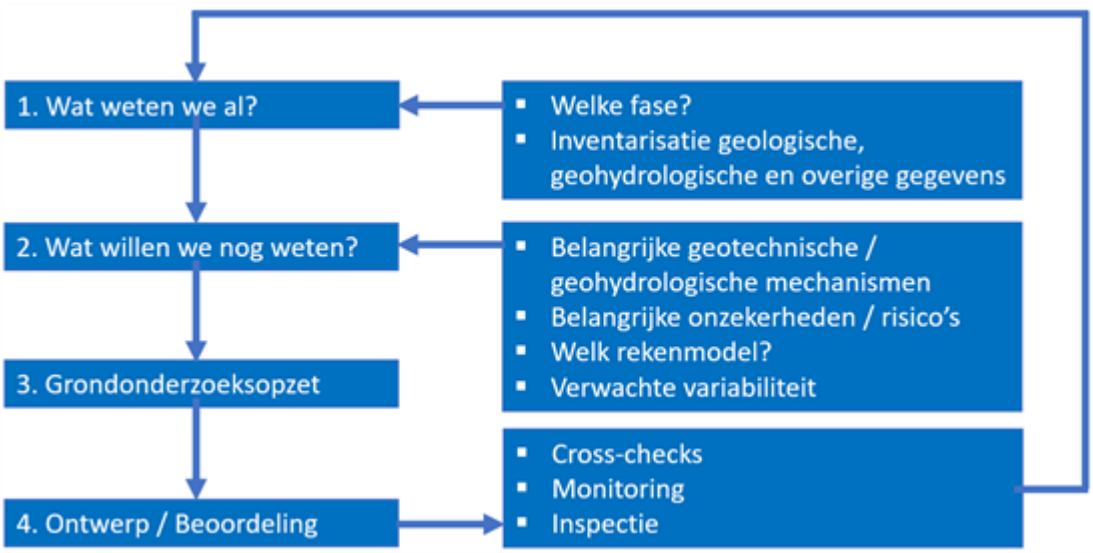
Versie 1.0: 2 juli 2025

Basisopzet van grondonderzoek

Inleiding

In de praktijk bestaat het proces van het opzetten van een grondonderzoeksplan uit een kringloop. In elke volgende cyclus worden dezelfde vragen gesteld, immers al naar gelang meer informatie beschikbaar komt, kan ook de scope van het onderzoek mee evalueren. Hoeveel stappen uiteindelijk doorlopen worden, is eveneens afhankelijk van de in het artikel Strategie opzet grondonderzoek genoemde factoren en van het gewenste resultaat. De opzet is het onderzoek van grof naar fijn in te steken en zo gericht meer informatie te verzamelen op locaties waar de variabiliteit groot is.

In de figuur is de kringloop die het opzetten van een grondonderzoeksplan behelst visueel inzichtelijk gemaakt.



Figuur Schema grondonderzoeksopzet

Het schema suggereert wellicht dat monitoring pas plaats vindt na ontwerp/beoordeling. Dat is echter niet het geval, monitoring kan tijdens de gehele levenscyclus van een dijk of waterkering plaatsvinden.

In Tabel 1 worden, gebaseerd op een eerder uitgevoerd CUR-onderzoek [CUR, 1991], ruwe indicaties voor de aard en omvang van een gangbaar grondonderzoek gegeven. De in deze tabel genoemde aantallen kunnen beschouwd worden als richtinggevend voor de eerste opzet van een grondonderzoeksplan. Zonder de genoemde aantallen tot norm te verheffen zullen we die aanduiden als 'standaard opzet'. Op basis van beschikbare gegevens kan overwogen worden om (lokaal) meer of juist minder grondonderzoek uit te voeren.

Al beschikbare boringen of sonderingen kunnen worden ingepast in het aan de hand van de indicaties in op te zetten grondonderzoeksplan. Hetzelfde geldt voor geofysisch onderzoek, laboratoriumonderzoek en peilbuisgegevens. Wel dient gelet te worden op de leeftijd van met name tijdgebonden gegevens, maar ook op de uitvoeringswijze en nauwkeurigheid van het bestaande grondonderzoek. Oude sonderingen bevatten bijvoorbeeld niet altijd een kleefmeting of een waterspanningsmeting en van boringen die met een milieukundig doel zijn uitgevoerd, zijn de aangetroffen bodemlagen niet altijd geclassificeerd volgens de geotechnische normen.

Al beschikbaar grondonderzoek, of gebiedskennis, kan ook juist aanleiding zijn voor een intensiever opzet van het grondonderzoek. Wanneer, bijvoorbeeld, uit een reeks achterlandboringen blijkt dat de dikte van de deklaag sterk varieert en tevens bekend is dat de locatie opbarstgevoelig is, dient overwogen te worden deze variatie nader uit te karteren. Niet alleen de dikte van de deklaag speelt bij opdrijven een rol, ook dienen de volumegewichten van de betreffende grondlagen en de waterspanningen in de ondergrond in beeld gebracht te worden.

Projectfase ontwerp, toetsing	Gegevens	Informatiebron, grondonderzoek	Omvang	Ondergrond-model en parameters
Definitie, Eenvoudige toetsing	Archief	Kaarten Oude metingen	Gehele dijkstrekking	Voorlopige globale bodemopbouw (conservatief)
	Geologische kennis	Specialist		
	Ervaring			
	Gebiedskennis			
Voorontwerp, Eenvoudige of gedetailleerde toetsing	Vooronderzoek, veld	Geofysisch (EM)	2 à 4 raaien	Basis ondergrond-model en/of geohydrologisch model Parameters uit classificatie
		Sonderingen	per 50 à 150 m	
		Boringen	per ca. 500 m	
		Peilbuizen	per 50 à 100 m	
	Vooronderzoek, laboratorium	Classificatie	min. 8 per boring	
Detailontwerp, Gedetailleerde of geavanceerde toetsing	Detailonderzoek, veld	Boringen	afhankelijk van de situatie	Aangepast onder-grondmodel en/of geohydrologisch model op specifieke locaties Parameters uit veld- en laboratorium-testen
		Divergegevens		
		Geofysisch		
	Detailonderzoek, laboratorium	Triaxiaaltesten	ca. 3 per boring, 4 per laag	
		Samendrukkings-testen	ca. 2 per boring, 3 per laag	
		Zeefanalyses	3 à 5 per laag	
Uitvoering, Beheer en onderhoud	Monitoring	Deformatie-metingen (zakbaak, InSAR)	Gehele dijkstrekking	Aanpassen o.b.v. gedrag tijdens uitvoering, Verfijnen model (continu toetsen), Cross-checks parameters en gedrag
		Gedragsmetingen (DigiSpectie)		
		(waterspanningen)		

Tabel 1 Voorbeeld van grondonderzoeksinspanning in verschillende projectfasen

Voor een nadere toelichting bij de te hanteren typen grondonderzoek wordt verwezen naar het Technisch rapport waterkerende grondconstructies en bijlage C 'Grondonderzoeksmethoden – aanvulling op TRWG'.

In tabel 2 zijn overwegingen opgenomen om bij de eerste opzet van het grondonderzoeksplan op voorhand al meer of minder grondonderzoek te plannen dan de in tabel 1 aangegeven 'standaard opzet'. De lijst is niet uitputtend bedoeld, maar geeft aan dat veel aspecten een rol kunnen spelen bij de keuze van de opzet van grondonderzoek. De genoemde overwegingen worden daarna toegelicht.

Meer grondonderzoek	Minder grondonderzoek
Overwegingen van praktische aard	*Overwegingen van praktische aard*
1 Beperkte tijd beschikbaar	1 Stapsgewijze optimalisatie mogelijk
2 Naast beoordelingsvraag ook ontwerpvraag	2 Hogere acceptatie risico's
3 Meerdere ontwerpvarianten	3 Monitoring / inspectie
4 Harde constructies in dijk	
5 Onheldere vraagformulering	*Overwegingen van inhoudelijke aard*
	4 Simpele, overzichtelijke dijk
Overwegingen van inhoudelijke aard	5 Reeds veel informatie beschikbaar
6 Grote dijk met brede berm	
7 Fluctuerende bodemopbouw	
8 Onzekerheid in waterspanningen	
9 Beperkte bereikbaarheid	
10 Uitkarteren niet-natuurlijke ondergrondse objecten	
11 Lokaal afwijkend gedrag	

Tabel 2 Overwegingen die kunnen leiden tot meer of minder grondonderzoek dan de 'standaard

opzet'

Meer grondonderzoek

1. Beperkte tijd beschikbaar: er is geen tijd om tussentijdse resultaten goed te bestuderen en onderbouwd vervolgstappen te nemen, bijvoorbeeld omdat de veldwerkzaamheden voor het stormseizoen afgerond moeten zijn of omdat de resultaten voor een bepaalde datum opgeleverd moeten worden.
2. Naast beoordelingsvraag ook ontwerpvraag: het onderzoek is in dit geval niet alleen gericht op de dijk, maar ook naast de dijk. Afhankelijk van de voorziene verbetermaatregelen aan binnen- of buitenzijde vinden er in het voor- of achterland extra metingen plaats.
3. Meerdere ontwerpvarianten: mogelijk zijn binnenwaartse of buitenwaartse versterking of oplossing in een constructieve maatregel. Vaak hangt de afweging tussen de verschillende varianten af van een politieke keus, die nog gemaakt moet worden op het moment dat het grondonderzoeksvoorstel gemaakt wordt. Grondonderzoek en vooral de berekeningsresultaten die hierop gebaseerd zijn, kan onderdeel van de besluitvorming zijn. Om alle varianten te kunnen vergelijken is dus een groter aantal meetpunten benodigd dan wanneer er slechts één ontwerpvariant is.
4. Harde constructies in dijk: in het grondlichaam van de dijk kunnen zich om verschillende redenen harde constructies bevinden zoals damwanden, keermuren, funderingen (op staal of op palen), kistdammen, dijkdeuvels, etc. Afhankelijk van de leeftijd van deze constructies zal informatie hierover (ontwerprapporten, grondonderzoek, etc.) beschikbaar zijn. Bij constructies waar dit niet het geval is (bijvoorbeeld een oude kadeconstructie die onderdeel uitmaakt van de waterkering) zal extra grond- en/of laboratoriumonderzoek uitgevoerd moeten worden in de directe nabijheid van deze elementen.
5. Onheldere vraagformulering: dit speelt voornamelijk indien in het ontwerp nog veel mogelijkheden open staan, zoals een mogelijke tracéverlegging of combinaties met andere functies zoals een weg, wonen of natuurontwikkeling. Om de consequenties in het ontwerp van al deze mogelijkheden in beeld te brengen, zal minimaal op globaal niveau een uitspraak gedaan moeten worden over de (on) mogelijkheden van de verschillende varianten. Dit resulteert niet in een intensiever grondonderzoek met meer meetpunten per lengte-eenheid, maar wel in meer meetpunten ter plaatse van alle mogelijke tracés of verbeteringen.
6. Grote dijk met brede berm: door het grote ruimtebeslag van de dijk kunnen er grote verschillen zijn in grondopbouw tussen achterland, berm, kruin en voorland. Om deze variaties in dwarsrichting in beeld te brengen, is het wenselijk per dwarsprofiel een groter aantal meetpunten aan te houden.
7. Fluctuerende bodemopbouw: hierbij wordt gedoeld op plotselinge (niet geleidelijk verlopende) discontinuïteiten waardoor op relatief korte afstanden (enkele meters tot enkele tientallen meters) grote verschillen in bodemopbouw kunnen voorkomen. Deze grote verschillen kunnen aanleiding zijn om lokaal een andere schematisering toe te passen (meer dan één kritisch dwarsprofiel per dijkvak of het opsplitsen van het dijkvak in meerdere dijkvakken). Gedacht wordt aan riviergeulen of hiermee samenhangende elementen (kreken, crevasses, etc.), rondom kunstwerken (grondverbetering toegepast), gebiedskennis (variaties zijn niet aangetroffen omdat sondeerafstanden te groot waren), veel menselijke ingrepen in de bodem (antropogene bodemelementen zoals diepploegen of omspuiten in achterland waardoor deklaag doorbroken is), oude dijkdoorbraken (gevuld met antropogeen materiaal, waardoor een lokale afwijking van de natuurlijke bodemopbouw ontstaan is).
8. Onzekerheden in waterspanningen: door de aanwezigheid van tussenzandlagen of zandgevulde geulen kunnen de waterspanningen lokaal afwijken van de basis schematisering. Ook is het mogelijk dat door een bepaalde dijkconfiguratie (bijvoorbeeld een relatief waterdoorlatend grondlichaam plaatselijk op een relatief waterondoorlatende ondergrond)

dat de freatische lijn in dijk neerslag gestuurd is. Om de verschillen in beeld te brengen kunnen extra meetpunten nodig zijn.

9. Beperkte bereikbaarheid: een optimale verdeling van onderzoekspunten is door bereikbaarheidsproblemen niet mogelijk (bijvoorbeeld sonderingen vanaf het water). Investering in speciaal equipement is alleen rendabel bij een groter aantal onderzoekspunten (de aanvoerkosten van een ponton zijn zo hoog dat het loont om meer grondonderzoek uit te voeren dan strikt noodzakelijk is volgens tabel 1).
10. Uitkarteren niet-natuurlijke ondergrondse objecten: veel Nederlandse dijken zijn meer dan een eeuw oud en kennen een lange geschiedenis van verbeteringen. Als gevolg hiervan kunnen zich in het dijklichaam allerlei elementen bevinden zoals wierdijken, (oude) wegcunetten, keileemkernen, etc. Om deze elementen uit te karteren kan aanvullend grondonderzoek nodig zijn.
11. Lokaal afwijkend gedrag -waarnemingen van kwel, scheurvorming en afschuiving- kan aanleiding zijn om aanvullend grondonderzoek uit te voeren om de aard van de lokale afwijking in kaart te brengen en de risico's ten aanzien van de verschillende mechanismen te kunnen berekeningen.

Minder grondonderzoek

1. Stapsgewijze optimalisatie mogelijk: na elke stap in grondonderzoek worden resultaten goed bestudeerd en wordt met maatwerk een volgende grondonderzoeksstap uitgevoerd. Bijvoorbeeld eerst het sondeeronderzoek uitvoeren en op basis van de resultaten het booronderzoek gericht inzetten en de te bemonsteren bodemlagen aangeven.
2. Hogere acceptatie risico's: de kans op overstroming van het achterland is beperkt (bijvoorbeeld door de aanwezigheid van een hoog voorland), de dijk wordt pas hersteld na optreden van schade.
3. Monitoring / inspectie: de overstromingskansen worden beheerst door monitoring en inspectie. Bij constatering van bijvoorbeeld verhoogde kwel in het achterland waardoor een verhoogde kans op piping ontstaat, worden maatregelen zoals het aanbrengen van zandzakken uitgevoerd.
4. Simpele, overzichtelijk dijk: de dijk heeft een eenvoudige geometrie (smalle, rechte en/of lage dijk, geometrisch bijna stabiel). De samenstelling van de dijk en ondergrond en de geohydrologische schematisering hebben nagenoeg geen consequenties voor de veiligheid (risico's) van de dijk. Het nauwkeurig in beeld brengen van deze informatie is voor de veiligheidsanalyse dan ook niet relevant, waardoor het inzetten van minder grondonderzoek gerechtvaardigd is.
5. Al veel informatie beschikbaar: er zijn weinig extra gegevens meer nodig, dit is nader toegelicht in het artikel Gebruik van beschikbare informatie bij grondonderzoek.

Restonzekerheden

De restonzekerheden over de dijksamenstelling, laagopbouw en lokale variaties in waterspanningen moeten worden bepaald door een deskundige. Er bestaan verschillende manieren om restonzekerheden te verdisconteren:

- Kiezen voor een voldoend conservatieve basisschematisering (waarmee de berekeningen worden uitgevoerd). Deze manier alleen toepassen om na te gaan of de restonzekerheden relevant zijn. Als de conservatieve schematisering tot een voldoende kleine faalkans leidt, zijn de restonzekerheden kennelijk niet relevant. Als de faalkans te groot is, is nader onderzoek nodig.
- Uitvoeren van een schematiseringanalyse (zie Schematiseringsfactor voor afschuiven).

- Het evalueren van verschillende ondergrondscenario's. Door sommatie van de faalkansen voor de verschillende scenario's, waarbij rekening wordt gehouden met de kans van optreden van de scenario's kan de overstromingskans worden bepaald (zie het artikel Modellering van onzekerheden).

Versie 1.0: 2 juli 2025

Strategie opzet grondonderzoek

Inleiding

Voor een betrouwbare schatting van de sterkte van een dijk en dus de overstromingskans van een bepaald dijktraject is het noodzakelijk de laagopbouw, samenstelling en eigenschappen van de grond in, onder en naast de dijk te kennen. Door middel van (aanvullend) grondonderzoek kan deze worden vastgesteld.

Bij de opzet van grondonderzoek moet rekening gehouden worden met de aard van de problematiek: mechanisme(n) die hiermee onderzocht moeten worden, de gewenste mate van detail van de uit te voeren veiligheidsanalyse en de reeds beschikbare kennis en informatie.

Bij opzetten van risicogestuurd grondonderzoek hanteren we de volgende denkvolgorde / vragen:

1. Mechanismen: welke zijn de relevante mechanismen waarvoor schematiseringen worden gevraagd?
2. Onzekerheden: welke onzekerheden en risico's zijn op voorhand te voorzien (ongewenste gebeurtenissen, met inschatting kans en indicatie ernst/gevolg)?
3. Rekenmodellen: welke (reken)modellen zullen of kunnen worden gebruikt en welke (onder)grondkarakteristieken moeten daarvoor worden geschematiseerd?
4. Kwantiteit / onderzoeksdichtheid: wat is de (verwachte) variabiliteit op de probleemlocatie en welke hoeveelheid metingen hoort daarbij?
5. Kwaliteit: Hoe bouw je mogelijkheden in om de kans op fouten in de uitvoering van het grondonderzoek en/of de interpretatie daarvan te verkleinen (cross checks)?

Voor het beantwoorden van deze vragen is informatie nodig met betrekking tot de ondergrond. In de praktijk zal er altijd al enige informatie beschikbaar zijn. Met betrekking tot de veiligheidsanalyse van primaire waterkeringen is altijd bestaande informatie beschikbaar, de primaire keringen zijn immers al vaker beoordeeld.

In Gebruik van beschikbare informatie bij grondonderzoek wordt nader ingegaan op de verschillende bronnen van beschikbare informatie en hoe deze gebruikt kunnen worden bij het opstellen van het grondonderzoeksplan.

Onderstaand wordt aan de hand van de vijf vragen van risicogestuurd grondonderzoek ingegaan op de strategie voor grondonderzoek.

Mechanismen

Voor welke faalmechanismen moeten gegevens worden verzameld? Bij dijken worden de volgende faalmechanismen onderscheiden die aanleiding kunnen vormen tot grondonderzoek:

- Erosie buitentalud, kruin en/of binnentalud.
- Afschuiven langs een diep glijvlak (binnenwaarts of buitenwaarts).
- Afschuiven of afdrukken van de bekleding op het binnentalud en uitspoelen enAfschuiven of afdrukken van de afschuiven bekleding op het binnentalud (afschuiven langs een ondiep glijvlak) en uitspoelen van kernmateriaal.

- Piping (opbarsten, heave en terugschrijdende erosie).
- Stabiliteit van het voorland (afschuiving, golfafslag en zettingsvloeiingen).

Om de dijk met betrekking tot deze mechanismen te beoordelen is informatie nodig. Per mechanisme is in verschillende paragrafen aangegeven welke informatie (grond-, laboratoriumonderzoek of gebiedsdekkende informatie) benodigd is om een veiligheidsanalyse voor beoordeling of ontwerp uit te voeren.

Voor een beschrijving van de faalmechanismen zelf wordt verwezen naar de betreffende fenomenologische beschrijvingen.

Kennis van de mechanismen is van wezenlijk belang voor het bepalen van het benodigde grond- en/of laboratoriumonderzoek en de te verkrijgen geohydrologische gegevens. Bij het bepalen van de overstromingskans van de waterkeringen wordt opgemerkt dat de benodigde informatie sterk samenhangt met het detailniveau van de analyse (eenvoudig, gedetailleerd of op maat).

Erosie kruin en binnentalud (kruinhoogte)

Voor het mechanisme Erosie kruin en binnentalud is, naast de erosiebestendigheid van het maaiveld, de kruinhoogte een bepalende factor. Feitelijk moet worden beoordeeld of de kruinhoogte in de voorliggende zicht-periode niet zal zakken onder het niveau waarbij overslag tot ontoelaatbare erosie van kruin of binnentalud leidt. Hiervoor zijn gegevens benodigd met betrekking tot de actuele kruinhoogte en het tijdsverloop van zettingen van de dijk. Op het vaststellen van de erosiebestendigheid van het maaiveld wordt ingegaan in het artikel Erosiebestendigheid grasmat.

De volgende situaties worden onderscheiden:

- Beoordelen van het ontwerp van een dijk of dijkversterking. Ook wanneer bij een dijkversterking geen dijkverhoging nodig is, is het mogelijk dat zettingen ter plaatse van de kruin zullen optreden, bijvoorbeeld door meezakken van de kruin bij aanleg van een binnenberm.
  - Hoogtemetingen: Bij het ontwerp zal altijd uitgegaan worden van een min of meer recente kruinhoogtemeting. Dit met behulp van lokale metingen (waterpassingen om de circa 25 m) of een gebiedsdekkende meting. Overigens is deze informatie alleen van belang voor het ontwerp- en bouwproces. Voor de veiligheidsbeoordeling is de (geplande) aanleghoogte na de bouwfase bepalend.
  - Zettingen: ten behoeve van het opstellen van het ontwerp moeten de te verwachten eindzetting op verschillende plaatsen in het dwarsprofiel worden geschat. Voor verschillende ontwerpstadia verschilt de informatiebehoefte, hier wordt nader op ingegaan onder de kop Rekenmodellen. Voor het opstellen van het definitieve ontwerp is het volgende grondonderzoek noodzakelijk (aantallen komen aan de orde onder de kop Kwantiteit):
    - Sonderingen ter plaatse van kruin en ter plaatse van voorziene belastingverhoging, om inzicht te krijgen in de ligging en dikte van samendrukbare grondlagen.
    - Boringen, locaties afgestemd op sondeeronderzoek. Boorlocaties worden zodanig gekozen dat, verspreid over het onderzoeksgebied, de verschillende samendrukbare lagen bemonsterd kunnen worden. Dit, om een representatief beeld van de samendrukbaarheid van de ondergrond te krijgen.
    - Laboratoriumonderzoek, voor het meten van samendrukkingsparameters van de afzonderlijke grondlagen.
- Veiligheidsbeoordeling van een dijk waar recent ophogingen hebben plaatsgevonden:
  - Hoogtemetingen: Lengteprofiel van kruinhoogten uit recente lokale of gebiedsdekkende

meting.
    - Zettingen: minimaal de uitgangspunten die bij het ontwerp zijn gebruikt (samendrukkingsparameters, tijd-zettingsgrafieken en eventueel zakbaakgegevens). Op basis hiervan kan een prognose van de te verwachten zettingen voor de komende 5 jaar worden gemaakt. Vooral verwachte zettingsverschillen moeten goed in beeld worden gebracht.
- Veiligheidsbeoordeling van een dijk waar al langere tijd geen belastingverhoging heeft plaatsgevonden:

    - Hoogtemetingen: Lengteprofiel van kruinhoogten uit recente lokale of gebiedsdekkende meting.
    - Zettingen: Door kruinhoogtemetingen van verschillende jaren met elkaar te vergelijken, kan een beeld worden verkregen van de toename in de tijd van zettingen en autonome bodemdaling. Hiermee kunnen, mits de omstandigheden gelijk blijven (geen grote polderpeilverlagingen etc.), door extrapolatie de te verwachten kruindaling in de voorliggende zichtperiode worden geschat. Zowel ingemeten profielen als gebiedsdekkende informatie lenen zich voor een dergelijke analyse. Opgemerkt wordt dat strekkingen waar zich relatief grote verticale deformaties voordoen, nader bekeken moeten worden.

Mechanisme afschuiven (binnenwaarts of buitenwaarts)

Voor de analyse van het mechanisme afschuiven (zowel beoordeling als ontwerp) zijn de volgende gegevens nodig:

- Geometrie: een landmeetkundige meting of het genereren van dwarsprofielen op basis gebiedsdekkende hoogte-informatie. Op basis van een analyse van variaties in profieltypen (met/ zonder berm) en variaties binnen typen (taludhelling, bermhoogte, hoogte voor- en/of achterland) wordt een indeling in dijkvakken gemaakt, waarbij per vak een representatief profiel wordt geselecteerd.
- Laagopbouw van de ondergrond en het dijklichaam: een sondeeronderzoek, ter plaatse van kruin, binnen- en buitenteen en voor- en achterland, eventueel te combineren met al beschikbaar grondonderzoek. In Gebruik van beschikbare informatie bij grondonderzoek wordt nader ingegaan op het gebruik hiervan.
- Op basis van de indeling in laagopbouw wordt een geotechnische vakindeling gemaakt. Deze moet op dusdanige wijze met de geometrische vakindeling gecombineerd worden, dat geen niet-reële combinaties gevormd worden en dat evenmin wel reële combinaties verloren gaan.
- Geotechnische eigenschappen grondlagen: booronderzoek, voor het verzamelen van (on)geroerde grondmonsters. Op basis van het sondeeronderzoek (of bestaande informatie) worden de te bemonsteren grondlagen aangegeven. Hierbij dient tevens gelet te worden op de locatie in het dwarsprofiel in relatie tot de meest waarschijnlijke locatie van de kritische glijcirkel.
- Model: voor het uitvoeren van glijvlakberekeningen zijn benodigd: volumiek gewicht en sterkteparameters, zie het artikel Keuze gedraineerd of ongedraineerd grondgedrag. Indien een ander model wordt toegepast, hangt de keuze van het uit te voeren laboratoriumonderzoek af van de modelvereisten.
- Belasting: de ligging van de freatische lijn en waterspanningsverloop in de ondergrond kunnen op basis van de samenstelling van dijk en ondergrond conservatief worden ingeschat. Voornamelijk wanneer dit leidt tot afkeuren van het profiel bij het uitvoeren van een veiligheidsbeoordeling, wordt aanbevolen tijdreeksen van het werkelijk verloop te verzamelen. Indien geen gegevens beschikbaar zijn met betrekking tot gemeten waterstanden, dienen peilbuizen of –filters geïnstalleerd te worden om de betreffende gegevens te verzamelen.

De sterkte-eigenschappen en de waterspanningen in en onder grondconstructies bepalen de weerstand tegen afschuiven. Hieronder wordt per mechanisme kort beschreven welke typen gegevens nodig zijn.

Afschuiven of afdrukken van de bekleding op het binnentalud (afschuiven langs een ondiep glijvlak) en uitspoelen van kernmateriaal

Het afschuiven van ondiepe glijvlakken betreft de stabiliteit van grondlagen met een kleine dikte aan het oppervlak van het binnentalud. Deze lagen (meestal de bekleding) kan afschuiven of worden afgedrukt. Ook kan er kernmateriaal uitspoelen door scheuren in de bekleding, of doordat er geen bekleding aanwezig is.

Het betreft verschillende mechanismen waarvan de modellering deels vergelijkbaar is. De voor de modellering benodigde gegevens zijn voor beide faalmechanismen gelijk, namelijk:

- Geometrie: zie het mechanisme afschuiven langs een glijvlak. Overigens wordt opgemerkt dat kruinhoogte een rol speelt bij stabiliteit bij overslag, indien de huidige kruinhoogte groter is dan het 0,1 l/m/s overslagdebietcriterium, kan dit mechanisme buiten beschouwing blijven (zie Erosie kruin en binnentalud).
- Samenstelling dijkkern en deklaag, inclusief laagdikte: het uitvoeren van handboringen (loodrecht op het talud) en het uitvoeren van laboratoriumonderzoek indien de kern uit zand bestaat (bepaling van zand- en lutumgehalte en eventueel zoutgehalte). Bij een dijk met een kleikern kan afdrukken van de bekleding of uitspoelen geen probleem opleveren. Met betrekking tot het toepassen van de rekenregels dienen echter bovendien de geotechnische eigenschappen van de grondlagen bekend te zijn.
- Geotechnische eigenschappen: de benodigde gegevens betreffen veldvochtig en verzadigd volumiek gewicht en sterkte-eigenschappen (φ' en c'). De volumieke gewichten kunnen bepaald worden door het steken van kleine monsterbussen (Kopecky ringen), welke in het laboratorium beproefd moeten worden. Voor de sterkte-eigenschappen is het steken van (Ackermann) bussen noodzakelijk. Hiertoe worden mechanische boringen geadviseerd. Het is wenselijk dit onderzoek te combineren met de bepaling van de sterkte-eigenschappen van dijk en ondergrond ten behoeve van het mechanisme afschuiven.

Piping

Onder bepaalde omstandigheden bestaat de mogelijkheid dat piping ontstaat. Om te bepalen of deze omstandigheden zich voordoen, dient de volgende informatie beschikbaar te zijn:

- Geometrie: evenals bij de overige mechanismen zijn gegevens met betrekking tot de geometrie benodigd. Meer specifiek betreffen de geometrische gegevens voor het beoordelen van de kans op piping de afstand tussen binnen- en buitenteen en gegevens met betrekking tot sloten (insteek, slootdiepte en –breedte) of overige waterpartijen en het hoogteverloop van voor- en achterland.
- Laagopbouw van dijk en ondergrond: om de dikte van eventuele deklagen in voor- en achterland te bepalen kan puntonderzoek (boringen en/of sonderingen) uitgevoerd worden. Indien grote variatie in deklaagdikte (en lokale afwezigheid hiervan) wordt aangetroffen, dient een voldoende dicht meetnet te worden aangelegd, om de onzekerheden in het al dan niet voorkomen van deze laag in voldoende mate te reduceren. Ook is het mogelijk hiervoor geofysische metingen uit te voeren. Deze technieken dienen echter altijd gecombineerd te worden met enkele puntmetingen (boringen of sonderingen). Eventueel uit te voeren boringen kunnen bovendien dienen voor het verzamelen van monsters voor het bepalen van grondeigenschappen van de lagen.

- Laageigenschappen: voor het uitvoeren van controle aan de hand van de rekenregels, zijn gegevens benodigd van deklaag en watervoerende zandlaag. Voor opbarstcontrole zijn het volumiek gewicht van de deklaag en geohydrologische parameters van deklaag en watervoerende zandlaag nodig. Voor de controle op voldoende kwelweglengte zijn gegevens over doorlatendheid en korrelgrootte nodig, zie artikel Schematiseren van de ondergrond voor piping.
- De belasting bij controle op opbarsten wordt gevormd door de stijghoogte in het watervoerend zandpakket behorende bij een hoge buitenwaterstand. In principe betreft dit de waterstand bij norm (WBN), maar opdrijven/opbarsten kan vaak ook al ook bij lagere buitenwaterstanden optreden. Met behulp van geohydrologische rekenmodellen kan deze stijghoogte bepaald worden. Hierbij spelen onzekerheden een belangrijke rol, omdat parameters voor die rekenmodellen moeilijk zijn te schatten. Die onzekerheden kunnen verminderd worden door het afijken van deze parameters met behulp van waterspanningsmetingen.

Stabiliteit van het voorland

Bij grondconstructies, die met al dan niet een aanwezig voorland van beperkte breedte zijn gelegen langs een onderwatertalud, dient rekening te worden gehouden met het optreden van instabiliteit van dit onderwatertalud.

Bij instabiliteiten spelen zowel geotechnische aspecten (sterkte) als wel de hydraulisch en morfologische condities (belasting) een rol.

Naast de aanwezigheid van een kritieke vooroever, is de aanwezigheid van zettings-, vloeiings- of afschuivingsgevoelige grondlagen voorwaarde voor mogelijke instabiliteit van de vooroever. Veelal is dit op basis van (geologische) gebiedskennis al dan niet uit te sluiten.

De beoordeling op potentieel risico op instabiliteit door afschuiving of zettingsvloeiing geschiedt in eerste instantie op basis van de geometrie van de vooroever. De betreffende gegevens kunnen verkregen worden met behulp van echolodingen. In geval van migrerende getijdegeulen is het verstandig gegevens van meerdere jaren met elkaar te vergelijken om het eventuele minimaal aanwezige voorlandprofiel te selecteren.

Indien op basis van deze analyse het risico op zettingsvloeiing of afschuiven van het voorland niet kan worden uitgesloten, moeten aanvullende maatregelen worden getroffen om de stabiliteit van de grondconstructie te waarborgen.

Het uitvoeren van specialistisch onderzoek van de betreffende grondlagen behoort tot de mogelijkheden, maar wordt gezien het specialistische karakter van de modellering in dit kader niet nader uitgewerkt.

Onzekerheden

Inschatting van onzekerheden over de aan de hand van de beschikbare informatie opgestelde schematiseringen van (onder)grondopbouw en waterspanningen is essentieel.

Er zijn twee opties voor het omgaan met schematiseringonzekerheden in een veiligheidsanalyse, namelijk:

- Verdisconteren van de onzekerheden via conservatieve uitgangspunten (conservatieve schematiseringen en/of een schematiseringfactor) voor de analyses. Dit is de aanpak die voorheen gebruikelijk was toen nog werd gewerkt met de overbelastingsbenadering. Dit leidt mogelijk tot ongewenste (dure) gevolgen voor het ontwerp, of tot een te hoge inschatting van

de overstromingskans bij de beoordeling.
- Verdisconteren van de onzekerheden door te werken met scenario's en de daarbij behorende kansen van voorkomen. Deze methodiek wordt nader toegelicht in de handleiding Overstromingskansanalyse Dijken/Dammen - deel 1 Geotechnische instabiliteit.

In het laatste geval leidt nader grondonderzoek tot het elimineren of reduceren van onzekerheden. De keuze voor het uitvoeren van nader grondonderzoek wordt doorgaans ingegeven door kostenoverwegingen (wat is de verwachte besparing versus de extra kosten) en de inschatting van de kans dat de besparingen waar gemaakt zullen worden door het nader grondonderzoek. In het artikel Basisopzet van grondonderzoek wordt nader ingegaan op deze problematiek.

Kwantiteit

Doorgaans is de opbouw van de dijk en ondergrond variabel. Liggingen en dikten van bodemlagen kunnen, afhankelijk van de ontstaansgeschiedenis, van plaats tot plaats sterk variëren. De benodigde dichtheid van grondonderzoek voor het betrouwbaar schematiseren van de ondergrond is, in algemene zin, groter naarmate deze ruimtelijke variabiliteit groter is. Bij het opzetten van grondonderzoek is daarom inzicht in de geologische/geomorfologische kenmerken van de onderzoekslocatie nodig. Daarbij wordt evenwicht gezocht tussen benodigde inspanning voor daadwerkelijk grondonderzoek, en op basis van dat inzicht geïdentificeerde overblijvende onzekerheden. Hierbij speelt uiteraard ook al beschikbare informatie, zoals eerder grondonderzoek ter plaatse of in de omgeving, of geobserveerd zettings- of vervormingsgedrag van een dijk een rol.

Vanzelfsprekend moet worden uitgegaan van fysisch mogelijke bezwijkvormen. De belangrijkste bezwijkvormen, stabiliteitsverlies van het buiten- en binnentalud en piping (ten gevolge van onderloopsheid), zijn georiënteerd in de richting loodrecht op de lengte-as van de dijk. Fysisch kan stabiliteitsverlies van een talud echter niet optreden in een geïsoleerde doorsnede of smalle schijf van de dijk. Er zal altijd sprake zijn van een zekere lengte. Dit houdt in dat een zeer lokale zwakke plek niet bepalend is voor de stabiliteit, wel echter de gemiddelde omstandigheden over een zeker traject in lengte- en dwarsrichting van de dijk. Over het algemeen blijkt zo'n traject tenminste enkele tientallen meters te zijn.

Bij terugschrijdende erosie is dit anders: het begin van dit proces wordt beheerst door zeer lokale omstandigheden. Ten gevolge van een plaatselijke perforatie of afwezigheid van de afdekkende kleilaag binnendijks kan de grondwaterstroming zich zozeer concentreren dat een zandmeevoerende wel ontstaat, die de dijk door een terugschrijdend erosieproces in een relatief smalle zone kan ondermijnen.

Het (aanvullend) grondonderzoek kan gericht zijn op het terugbrengen van een tweetal principieel verschillende onzekerheden:

1. Onzekerheden in de opbouw van de ondergrond. Doel is daarbij het vaststellen van trajecten die uit een oogpunt van stabiliteitsverlies een gelijke schematisering van grondlagen vertonen. Dit kan ook leiden tot het uitsluiten van een ongunstige grondopbouw die, gezien de geologie op het betreffende dijktraject zou kunnen voorkomen.
2. Onzekerheden in de eigenschappen van de grondlagen. Doel is het vaststellen van de eigenschappen van de verschillende grondlagen en de variaties daarvan ter plaatse van het te analyseren dijktraject.

Voor het onder 1. genoemde aspect komen onderzoeksmethoden in aanmerking waarmee op snelle wijze een betrouwbaar en zo mogelijk een continu beeld wordt verkregen van het verloop in ligging en dikte van de verschillende grondlagen onder en in de dijk. Een globaal beeld is in principe al bekend

door de Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS) eventueel aangevuld met lokale geologische en bodemkundige kaarten. Dit beeld kan mogelijk worden verbeterd door geo-fysisch onderzoek. Geschikte methoden zijn de zogenaamde geo-elektrische en elektro-magnetische verkenningen.
In het algemeen is het nodig om het beeld van de grondopbouw verkregen met geo-fysisch onderzoek aan te vullen met boringen en sonderingen. Zowel de boringen als de sonderingen geven een betrouwbaar beeld van de bodemopbouw ter plaatse: de ligging en de dikte van de verschillende grondlagen wordt vastgesteld, en er wordt een indruk verkregen van de kwaliteit van die lagen. Door de combinatie van geo-elektrisch onderzoek, sonderingen en boringen is het in het algemeen mogelijk kenmerkende trajecten van de dijk met een beperkte mate van onzekerheid vast te stellen.

Voor het onder 2. vermelde aspect moet de maaswijdte van het grondonderzoek in kenmerkende trajecten van de dijk zowel in langs- als in dwarsrichting worden verfijnd. Voor de analyse van de stabiliteit van een talud moet het grondonderzoek in eerste instantie gegevens opleveren over de schuifweerstandseigenschappen van de grond, en de spreiding ervan. Deze eigenschappen worden over het algemeen bepaald door middel van laboratoriumproeven op ongeroerde monsters uit de verschillende grondlagen, die bij boringen worden genomen. Een globale indicatie van de (variatie in de) schuif-weerstandseigenschappen wordt ook verkregen uit de resultaten van terreinproeven zoals sonderingen en vinproeven.

Bij de stabiliteitsanalyse spelen ook de waterspanningen in dijk en ondergrond een belangrijke rol. Naast geometrische en hydrologische randvoorwaarden dienen voor de bepaling daarvan de doorlatendheidscoëfficiënt en eventueel de consolidatiecoëfficiënt van de verschillende grondlagen bekend te zijn. Die kunnen worden bepaald uit laboratoriumproeven op ongeroerde monsters, of uit terreinonderzoek.

Kwaliteit

Kwaliteit heeft zowel betrekking op betrouwbaarheid van de grondonderzoekstechniek en het uitvoeren ervan, als op de interpretatie van het grondonderzoek, uiteindelijk uitmondend in gekozen schematiseringen en identificatie van (rest) onzekerheden.

In het artikel Gebruik van beschikbare informatie bij grondonderzoek wordt nader ingegaan op geschiktheid en betrouwbaarheid van grondonderzoekstechnieken. De interpretatie van grondonderzoek tot de uiteindelijke keuze van grondmechanische of geohydrologische schematiseringen omvat doorgaans verschillende stappen. Bijvoorbeeld, het onderscheiden van grondlagen in sondeergrafieken en classificeren van grondtypen (mede aan de hand van combinatie van sondeergrafieken en boringen) en het vervolgens combineren van deze informatie tot een ruimtelijk beeld van grondlagen. Dit is mensenwerk waarvoor vakmanschap nodig is. Een gebruikelijke vorm van kwaliteitsborging is daarbij het laten beoordelen van interpretaties door een collega. Daarnaast kan gezocht worden naar manieren om interpretaties van grondonderzoek te toetsen aan andersoortige waarnemingen: ‘cross-checks’.

Een voorbeeld van een cross-check is verificatie op basis van gedragswaarnemingen. Wanneer, bijvoorbeeld, uit waarnemingen blijkt dat de binnenteen van de dijk altijd nat is tijdens hoge waterstanden, terwijl dit volgens de geohydrologische modelberekeningen niet aannemelijk zou zijn, dan moet worden nagegaan waar deze discrepantie uit voortkomt. Het kan dan noodzakelijk zijn het model aan te passen (laagopbouw of geohydrologische laageigenschappen of beiden), al dan niet in combinatie met aanvullende metingen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Gebruik van beschikbare informatie bij grondonderzoek

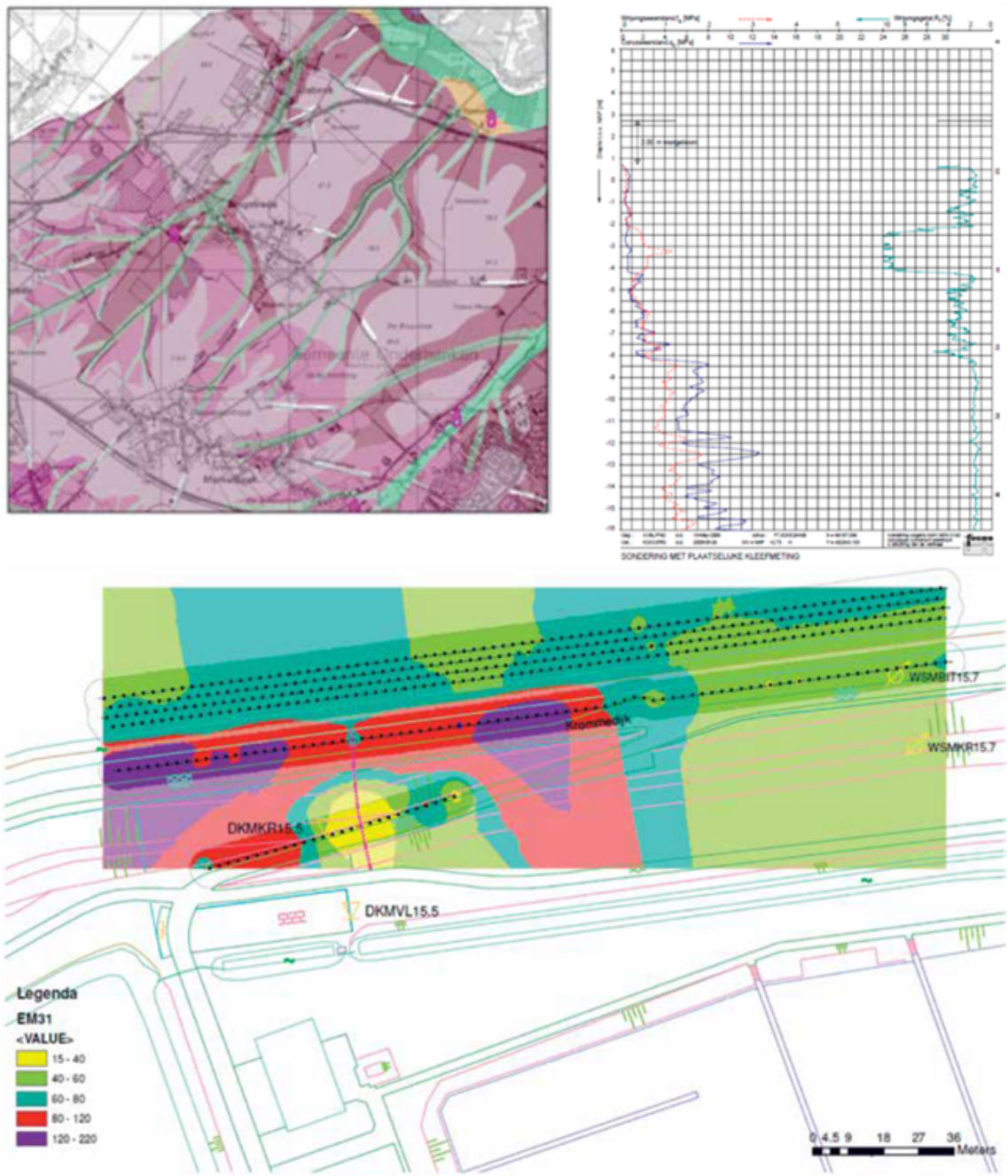
Inleiding

Bij het maken van een plan van aanpak voor grondonderzoek vormt reeds beschikbare informatie een belangrijke basis. Deze paragraaf gaat in op mogelijke bronnen die richtinggevend zijn bij het opzetten van een plan voor grondonderzoek of aanvullende informatie bevatten. Te denken valt aan:

- Geologische, bodem- en geohydrologische gegevens (bijvoorbeeld geologische kaarten of stijghoogtecurves in de DINO-database, etc.). Deze informatie is uitsluitend geschikt voor een globale karakterisering van voorkomens van grondlagen en typen grondopbouw.
- Bestaand grondonderzoek. Dit kan grondonderzoek zijn dat in het kader van een eerdere veiligheidsanalyse (beoordeling of ontwerp) van (onderdelen van) de dijk is uitgevoerd, maar ook bestaand grondonderzoek betreffende, of in de nabijheid van, de waterkering (bijvoorbeeld ten behoeve van de aanleg van een weg of een bouwproject in de nabijheid van de dijk) (gegevens uit de DINO- of BRO-database). Let wel, de informatiebehoefte kan per mechanisme verschillen.
- Ontwerp- en revisietekeningen of resultaten van eerdere beoordelingen. Vooral de bij de betreffende veiligheidsanalyse gehanteerde uitgangspunten zijn hierbij van belang. Bij de overgang op een nieuwe veiligheidsfilosofie, zoals die in 2017 heeft plaatsgevonden van de overbelastingsbenadering naar de overstromingskansbenadering, zijn berekeningen die voor 2017 zijn uitgevoerd, veelal niet meer bruikbaar. De daarvoor gebruikte (meet)data kunnen echter nog wel waardevol zijn, al zullen deze veelal opnieuw moeten worden geïnterpreteerd om zicht te krijgen op de verwachtingswaarden en de bijbehorende onzekerheden. Ook ontwerpuitgangspunten zoals een drainageconstructie in de binnenteen van de dijk, kunnen op basis van oude ontwerptekeningen worden afgeleid. Deze kunnen in een veiligheidsanalyse van de dijk worden meegenomen, mits geverifieerd wordt dat deze constructies onderhouden zijn en bovendien naar behoren functioneren.
- Beheersinformatie (gedrag van de waterkering, al dan niet onder extreme omstandigheden). Deze gegevens dienen ter verificatie van de berekeningsuitkomsten. Indien de uitkomsten niet stroken met de waarnemingen, dient gecontroleerd te worden of de gekozen schematisering juist is.
- Historisch en/of archeologisch onderzoek. Dergelijke onderzoeken kunnen waardevolle informatie opleveren omtrent de dijkopbouw en hoe dat in het verleden heeft plaatsgevonden en met welke materialen [Halter, 2018].

In de volgende figuur zijn enkele voorbeelden van beschikbare informatie opgenomen.

De geulenkaart geeft een indruk van de ligging van (bekende) geulen. De sondering is een veelgebruikte methode om op een aantal punten de verticale opbouw gedetailleerd vast te stellen. De EM-meting wordt toegepast om (in aanvulling op sondeer- en booronderzoek) onbekende zandgeulen of objecten op te sporen en globaal uit te karteren.



Figuur Voorbeeld van geïnterpreteerde informatie (geomorfologische kaart – linksboven), feitelijke sondeergrafiek – rechtsboven) en geofysisch verkennend onderzoek (EM-meting – onder)

Het spreekt voor zich dat de betrouwbaarheid van meetgegevens toeneemt, wanneer naar verhouding meer feitelijke gegevens beschikbaar zijn. Verder dient bij de inschatting van de betrouwbaarheid rekening te worden gehouden met de gehanteerde meettechniek:

- Is de gebruikte techniek gestandaardiseerd of niet? De meeste in Nederland toegepaste grond- en laboratoriumonderzoekstechnieken zijn gestandaardiseerd.
- Hoe nauwkeurig is de techniek en/of wijze van uitvoering? Met betrekking tot grondonderzoekstechnieken zijn hier in algemene termen wel uitspraken over te doen. De wijze van uitvoering is echter een lastiger punt. Hoe voorzichtig bijvoorbeeld een steekbus gestoken, afgedicht en vervoerd is, staat vaak niet vermeld in de specificaties, de rapportage van de monstername. Wel kunnen onnauwkeurigheden hierin consequenties hebben op de

laboratoriumresultaten wanneer het monstermateriaal uit de bus wordt toegepast voor laboratoriumtesten. In de praktijk is het lastig hierover een uitspraak te doen en wordt er op vertrouwd dat de monstername, uitvoering van werkzaamheden conform richtlijnen is uitgevoerd. Wanneer echter vaststaat dat een meting of proef niet conform de juiste instructies is uitgevoerd, dienen de consequenties (onzekerheden) hiervan inzichtelijk te worden gemaakt in de veiligheidsanalyse.

- Wanneer zijn de metingen uitgevoerd? Bijvoorbeeld bij meetreeksen van peilbuis opnamen is het van belang om te weten of gedurende extreme omstandigheden is gemeten. Ook de meetfrequentie kan een rol spelen. Tweewekelijkse opnamen geven minder gedetailleerde informatie over de respons van de waterspanningen in de pleistocene ondergrond, dan metingen met een frequentie van een dag of een uur. En voor waterkeringen in het getijdengebied zijn nog hogere meetfrequenties gewenst om het getijdenafhankelijke waterspanningsgedrag uit af te leiden. Algemeen kan worden gesteld dat men zich vooraf dient af te vragen welke fluctuaties in waterstanden verwacht worden en hierop de meetfrequentie af te stemmen.

Geologische, geomorfologische en/of geohydrologische informatie

Als eerste stap in de schematisering van samenstelling van het dijklichaam, laagopbouw van ondergrond onder en naast de dijk en geohydrologische kenmerken kan gebruik gemaakt worden van:

- Geologische, geomorfologische en/of geohydrologische kaarten (algemene informatie).
- Kennis van de (geologische/ geomorfologische) ontstaanswijze van een gebied.
- Kennis van het geohydrologisch systeem waartoe het onderzoeksgebied behoort.
- Informatie uit de landelijke database voor grondonderzoek.

Het doel van deze stap is het verkrijgen van inzicht in de (globale) bodemopbouw. Hier kunnen eerste globale schematiseringen op gebaseerd worden (stappen 1 en 2 in Schematiseren ondergrond). Deze schematiseringen kunnen mogelijk al gebruikt worden voor het uitvoeren van berekeningen op globaal niveau (definitiefase in het ontwerp en soms ook de eenvoudige beoordeling). Het verkregen inzicht uit deze bronnen is mede richtinggevend bij het opstellen van grondonderzoeksplannen voor volgende fasen (stap 3 in Schematiseren ondergrond).

Bestaand grondonderzoek

Vaak is al eerder uitgevoerd lokaal grondonderzoek beschikbaar, dat bruikbaar is bij het invullen van een grondonderzoeksplan. De bruikbaarheid van dit onderzoek moet echter altijd getoetst worden. Overwegingen hierbij zijn, niet uitputtend:

- Vaak zal het bestaande grondonderzoek niet exact ter plaatse van de waterkering zijn uitgevoerd. Op basis van de afstand tot de waterkering, de mate van aangetroffen variatie, aangevuld met bijvoorbeeld lokale gebiedskennis zal een inschatting gemaakt moeten worden van de bruikbaarheid. Indien uit een uitgebreid sondeeronderzoek op enige afstand van de dijk blijkt dat de variatie in grondlaagopbouw gering is, kan dit doen vermoeden dat ook de ondergrondopbouw ter plaatse van de dijk vrij homogeen. Overwogen kan dan worden om het grondonderzoek ter plaatse van de dijk, in eerste instantie, minder dicht op te zetten. Dit vermoeden moet echter wel geverifieerd worden aan de hand van andere bronnen (zie Geologische, geomorfologische en/of geohydrologische informatie). Ook moet, achteraf na het uitvoeren van het grondonderzoek, aan de hand van de resultaten nagegaan worden of dit vermoeden juist was.
- Het doel van bestaand grondonderzoek (bijvoorbeeld sonderingen en boringen) moet

meegenomen, wanneer overwogen wordt dit te gebruiken als vervanging voor uit te voeren grondonderzoek. Sonderingen en boringen worden, als het goed is, uitgevoerd conform een genormaliseerd voorschrift. Wanneer die echter dienden om de diepte en draagkracht van een diepe zandlaag te onderzoeken, wordt, om snel te werken, het voorschrift in de ondiepe slappe lagen nog wel eens genegeerd. Het ondiepe traject is dan niet of slechts in beperkte mate bruikbaar.

- Het combineren van gegevens kan worden gebruikt om de mate van betrouwbaarheid van informatiebronnen te controleren. Indien bijvoorbeeld een geologische kaart en één boring beschikbaar zijn, kan geverifieerd worden of de in de boring aangetroffen grondslag overeenkomt met wat op basis van de geologische kaart verwacht had mogen worden. Het combineren van dergelijke verschillende informatiebronnen levert nuttige informatie met betrekking tot de (on)bruikbaarheid van gegevens.
- Uit de DINO-database kunnen mogelijk meetreeksen van stijghoogten beschikbaar zijn van de projectlocatie. Bij dit type gegevens dient te worden nagegaan of deze gegevens nog wel actueel zijn. Bijvoorbeeld gegevens met betrekking tot stijghoogtes in het watervoerende zandlagen kunnen sterk beïnvloed zijn geweest door aan- of afwezigheid van grote (industriële) onttrekkingen. Van groot belang in de nabijheid van een waterkering is natuurlijk of de metingen gerelateerd zijn aan dagelijkse of extreme omstandigheden.

Ontwerptekeningen, -berekeningen en/of resultaten eerdere beoordeling

Wanneer ontwerptekeningen, -berekeningen en/of resultaten van eerdere beoordeling van de dijk beschikbaar zijn, betekent dit dat er al een schematisering van dijk, ondergrond en waterspanningen gemaakt is. Er zal een dijkvakindeling gekozen zijn en hierbij behorende representatieve dwarsprofielen zullen zijn geselecteerd. Het is van belang de uitgangspunten van deze schematisering te kunnen beoordelen. De keuzen die in de schematisering gemaakt zijn, moeten inzichtelijk zijn om te kunnen bepalen of deze beschikbare informatie volstaat voor de uit te voeren veiligheidsanalyse.

Het detailniveau van de beschikbare gegevens is hierbij van belang. Dit kan sterk samenhangen met de ouderdom van de gegevens. Onderscheid kan gemaakt worden naar het type beschikbare informatie op basis van de controleerbaarheid van de gehanteerde uitgangspunten. Punten van overweging zijn:

- Is bekend waarop de schematisering van dijk, ondergrond en waterspanningen gebaseerd is? Is er grondonderzoek uitgevoerd en zo ja, hoeveel? En zijn de resultaten van het grond- en/of laboratoriumonderzoek beschikbaar?
- Zijn de gemaakte schematiseringkeuzen inzichtelijk? Een inschatting moet gemaakt kunnen worden van de onzekerheden in de gekozen schematisering. Indien alleen tekeningen en/of berekeningen beschikbaar zijn, kan dit niet gecontroleerd worden.

In tabel 1 is per type informatie aangegeven welke gegevens hieruit verkregen kunnen worden (detailniveau) en op welke wijze de mate van betrouwbaarheid van deze gegevens ingeschat kan worden.

Tabel 1 Beschikbare informatie uit bestekken / ontwerpen / eerdere beoordelingen

Informatiebron	Detailniveau gegevens	Betrouwbaarheid

Bestekstekeningen	Geometrie en informatie met betrekking tot het uitgevoerde werk (aanleg dijk, berm of vervangen bekleding) gedetailleerd. Gegevens met betrekking tot samenstelling dijk en/of ondergrond doorgaans niet beschikbaar	Als eerste informatie goed. Wees bedacht op afwijkingen tussen bestek en de realisatie
Eerder uitgevoerde veiligheidsbeoordeling (ontwerp en/of beoordeling)	Detailniveau berekening zegt iets over detailniveau bruikbaarheid. Dit houdt in dat minimaal de bij de berekeningen gehanteerde uitgangs- punten beschikbaar moeten zijn	Indien uitgangspunten niet beschikbaar, niet betrouwbaar Indien uitgangspunten wel beschikbaar, onzekerheden in schematisering in kaart brengen
Oude rapportages van veiligheidsanalyses (ontwerp en/of beoordeling)	Wanneer rapportages volledig zijn vormen zij een gedetailleerde bron van informatie voor nieuwe veiligheidsanalyses	Goed, mits schematiseringkeuzes goed beargumenteerd en volledig gerapporteerd
Grondonderzoek behorend bij eerdere veiligheidsanalyses	Te beoordelen als bestaand grondonderzoek (ter verificatie van de gehanteerde schematisering, dijkvakindeling en keuze representatief dwarsprofiel)	Te beoordelen als bestaand grondonderzoek (afhankelijk van uitvoeringsmethode etc.)

Beheerinformatie

Beheerinformatie kan in diverse vormen beschikbaar zijn en kan bestaan uit losse waarnemingen en/of metingen, bijvoorbeeld meldingen van schade of het optreden van wateroverlast al dan niet in combinatie met bepaalde omstandigheden (bijvoorbeeld hoogwater). Waarnemingen kunnen aanleiding geven tot het uitvoeren van specifiek grondonderzoek, om bijvoorbeeld de aard van de schade of het gevolg voor de veiligheid van de waterkering te controleren.

Ook is het mogelijk dat beheerinformatie een bevestiging van het grondonderzoek en/of de modelberekeningen geeft. De waarnemingen vormen dan een cross check op het grondonderzoek of de uitgevoerde metingen.

In tabel 2 is een overzicht gegeven van typen beheerinformatie en de toepassingsmogelijkheden voor het onderbouwen van het grondonderzoeksplan.

Beheerinformatie kan medebepalend zijn bij het vaststellen van de benodigde aard en omvang van grondonderzoek; meer of minder dan ‘standaard’, of specialistisch veld- of laboratoriumonderzoek.

Tabel 2 Beheerinformatie en toepassing op het grondonderzoeksplan

Informatietype	Toepassingsmogelijkheden	Betrouwbaarheid
Dijkschouw (controle functioneren dijk op basis van fysieke kenmerken)	Geschikt voor uitvoeren beheer en onderhoud van de dijk, indien schades (vervormingen) of andere indicaties van niet goed functioneren van de dijk worden waargenomen, kan hierop grondonderzoek ingezet worden	Mits waarnemingen op uniforme wijze worden vastgelegd (DigiSpectie), is dit een betrouwbare informatiebron
Waarneming van opgetreden schade (al dan niet samen hangend met extreem hoog of laag water)	Afhankelijk van de aard van de schade en een inschatting van het mechanisme waarvan de schade een indicatie is, kan specifiek grondonderzoek worden ingezet (bijvoorbeeld ter bepaling van sterkte- of samendrukkings-eigenschappen of waterspanningsmetingen)	Indien de waarneming gecombineerd wordt met foto's, locatie (x, y en coördinaat) is dit een betrouwbare bron
Historische informatie van functioneren dijk bij zeer extreme belastingen	In te zetten in plaats van het uitvoeren van grondonderzoek om de stabiliteit van de dijk te beoordelen. Let wel aan deze methode hangt een groot aantal voorwaarden voor toepassing en vormt lang niet altijd een alternatief voor onderzoek.	Veelal zijn uitsluitend waterstanden bekend en geen waarnemingen van het functioneren van de dijk, de betrouwbaarheid is hierdoor veelal laag.
Kruinhoogtemetingen	Kruinhoogtemetingen van meerdere jaren geven inzicht in het lange termijn vervormingsgedrag van de dijk. Een verschil in kruindaling kan een aanwijzing zijn van een slappe plek in de dijk of ondergrond.	Betrouwbaarheid is groter als bron van meting (bijvoorbeeld dwarsprofiel) beschikbaar is. Recente metingen zijn over het algemeen betrouwbaarder dan oude metingen.

Grondonderzoek van grof naar fijn

Inleiding

Aanvullend lokaal grondonderzoek is een optie voor het aanscherpen van veiligheidsanalyses, indien grondmechanische analyses, waarbij gebruik is gemaakt van globale gegevens, zoals grondeigenschappen die ontleend zijn aan regionale proevenverzamelingen, niet leiden tot een voldoende kleine overstromingskans. De onderliggende veronderstelling is dat bij gebruik van globale gegevens de schematiseringen voor de veiligheidsanalyses onzekerder zijn. Ook met conservatieve scenario's die op basis van geen of beperkt lokaal onderzoek niet kunnen worden uitgesloten, zal rekening moeten worden gehouden. Een ander voorbeeld is de karakteristieke schuifsterkte van grond in stabiliteitsanalyses. Als deze ontleend wordt aan een regionale proevenverzameling, dan zal ook daarin de onzekerheid relatief groot zijn. En grote onzekerheden in schematisatie en sterkteparameters leveren een relatief hoge overstromingskans op.

Om na te gaan welk type en welke omvang van lokaal grondonderzoek potentieel soelaas biedt, zal men de verschillende schematiseringstappen die in de veiligheidsanalyse een rol spelen, moeten analyseren. Bij de veiligheidsanalyse die tot een te ongewenst hoge overstromingskans heeft geleid, is voor elk van die stappen informatie gebruikt. De hoeveelheid en kwaliteit van de beschikbare informatie kan van geval tot geval sterk verschillen.

Winstkansen, door het inwinnen van informatie via lokaal grondonderzoek zijn natuurlijk het grootst wanneer de beschikbare informatie voor de veiligheidsanalyse beperkt was of van matige kwaliteit. In dat geval is immers, als het goed is, de in acht genomen onzekerheid bij de schematisering het grootst.

De eerste stap is het nagaan welke onzekerheidsreductie nodig is om tot een positief resultaat te komen. Aan de hand hiervan is de doelstelling voor het lokale onderzoek expliciet te formuleren. Bijvoorbeeld in termen van: lokaal onderzoek moet leiden tot een karakteristieke schuifsterkte die 10 procent groter is dan de schuifsterkte waarmee de veiligheidsanalyse is uitgevoerd. Of, lokaal onderzoek moet de kans op de aanwezigheid van een lens met slap organische klei reduceren tot 1%. De volgende stap bestaat uit het vaststellen van de aard en omvang van het lokaal grondonderzoek dat nodig is om de doelstelling te realiseren en het schatten van de kans dat zulk onderzoek inderdaad leidt tot realisatie van de doelstelling. Dit laatste is doorgaans niet erg gemakkelijk, maar wel essentieel voor de kosten/batenanalyse. De verwachte besparing van lokaal grondonderzoek door een beter resultaat moet immers (liefst ruim) opwegen tegen de kosten van dat grondonderzoek, inclusief het benodigde bureauwerk.

In het volgende wordt deze gedachtegang verder uitgewerkt. Daarbij blijkt dat een expliciete objectieve en kwantitatieve analyse niet altijd, of eigenlijk vaak niet, tot de mogelijkheden behoort met de huidige kennis en inzichten. Toch moeten we dan maar roeien met de riemen die we hebben om de gedachtegang zo goed als mogelijk is te concretiseren.

Opbouw dijk en ondergrond

Indien voor de veiligheidsanalyse al stabiliteitsanalyses zijn uitgevoerd moet hiervoor al een opbouw van dijk en ondergrond zijn gekozen. Veelal zal die opbouw, afhankelijk van de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van informatie, aan de conservatieve kant gekozen zijn. Of de kans toegekend aan conservatieve scenario's zal relatief hoog zijn, als de onzekerheid is gemodelleerd met verschillende scenario's. Ruwweg gezegd zal, naarmate de informatie onzeker of minder betrouwbaar is, de mate van conservatisme groter zijn en daarmee de kans op winst door lokaal grondonderzoek om tot een betere schatting van de dijk- en ondergrondopbouw toenemen.

Bij het vaststellen van, dat wil zeggen een keuze maken voor, een model van de opbouw van dijk en

ondergrond voor de eerste analyse spelen verschillende aspecten een rol, namelijk:

- De keuze van het model van de ondergrondopbouw moet representatief zijn voor het traject van de dijk waarvoor de stabiliteitsanalyse representatief geacht wordt. Doorgaans betekent dit dat uitgegaan moet zijn van de ongunstigst mogelijke ondergrondopbouw binnen dit traject (overigens in combinatie met de opbouw van de dijk, die we nu even min of meer uniform beschouwen in het dijktraject waarvoor de analyse representatief moet zijn).
- Afhankelijk van de aard en hoeveelheid informatie die over de ondergrondopbouw beschikbaar is, zullen er onzekerheden zijn over de schematisatie van de ondergrondopbouw. Globaal kunnen we twee categorieën onderscheiden, namelijk onzekerheden over de (diepte)ligging van overgangen tussen verschillende lagen en onzekerheden over het wel of niet voorkomen van lokale afwijkingen van beperkte afmeting, zoals bijvoorbeeld een lens met slap materiaal of een zandbaan, die bij het bodemonderzoek niet is opgemerkt.
- De variatie van diepteliggingen van laagovergangen wordt veelal ontleend aan 'geotechnische lengteprofielen', gebaseerd op boringen en sonderingen in één of meer langsraaien in de lengterichting van de dijk (as, eventueel ook buiten en binnen). Stabiliteitsanalyses worden uitgevoerd voor doorsneden dwars op het dijktraject. De variatie van diepteliggingen van laagovergangen in zo'n doorsnede wordt, indien meerdere geotechnische lengteprofielen beschikbaar zijn, gebaseerd op interpolatie tussen de lengteprofielen. De mate waarin diepteliggingen van laagovergangen onzeker zijn is afhankelijk van de min of meer onvoorspelbare variaties ervan die in het gebied voorkomen, de onderlinge afstand tussen de (punt)metingen waarop de geotechnische profielen zijn gebaseerd en de mate waarin die puntmetingen onderling consistente informatie geven. Wanneer van één doorsnede naar een volgende een grondlaag 'verdwijnt' (op basis van het grondonderzoek in die doorsneden i.c. boringen en/of sonderingen), dan moet gegist worden naar het verloop van de die grondlaag tussen de meetpunten. Indien de schematisering plaatsvindt op basis van slechts één geotechnisch lengteprofiel is hooguit 'zachte' informatie beschikbaar over het verloop van laagovergangen in de richting dwars op het dijktraject. Onder 'zachte' informatie wordt verstaan gebiedskennis, geologische kennis, gezond verstand, etc.;
- Lokale afwijkingen van beperkte afmeting kunnen, afhankelijk van die afmeting en de intervallen tussen meetpunten of meetlijnen, niet opgemerkt zijn in het grondonderzoek. Toch kan de geologie van een gebied aanleiding geven tot de veronderstelling dat zulke afwijkingen er wel kunnen zijn, ook al zijn ze niet gevonden bij het grondonderzoek.
- De ondergrondopbouw is niet alleen van belang voor het identificeren en lokaliseren van mogelijke afschuifmechanismen zelf, maar ook voor het inschatten van de waterspanningsopbouw van de ondergrond, met name als die gerelateerd is aan de buitenwaterstand (de geohydrologische systeemwerking in en onder de dijk).

Aan de schematisering van dijk- en ondergrondopbouw kunnen dus nogal wat onzekerheidsaspecten zitten.

Er bestaan geen vast omschreven werkwijzen hoe met die onzekerheden dient te worden omgegaan bij het kiezen van een veilige schematisatie. Veel gebeurt 'op het gevoel' en hangt af van subjectieve inschattingen van de geotechnisch ingenieur of de geoloog. Een illustratie hiervan vormt het 'ring'-onderzoek dat in het kader van de praktijkproef 'Bergambacht' is uitgevoerd. In die tijd werd overigens nog uitgegaan van de een enkele schematisatie en was het werken met verschillende scenario's nog niet gebruikelijk. Dat ringonderzoek liet grote verschillen zien tussen berekende stabiliteitfactoren bij de verschillende ondergrondschematiseringen door een vijftal (ervaren) geotechnische adviseurs, op basis van dezelfde grondonderzoeksgegevens. Het onderzoek liet wel zien dat naarmate de hoeveelheid grondonderzoeksgegevens groter werd de verschillen afnamen. Echter, ook bij de grote hoeveelheid grondonderzoeksgegevens die uiteindelijk beschikbaar was, en

waarbij de hoeveelheid informatie die doorgaans beschikbaar is in praktijksituaties verbleekt, bleven de verschillen in uitkomsten van stabiliteitsanalyses fors, namelijk zo'n tien procent, zie [Koelewijn, 2002]. In de huidige beoordelingspraktijk kunnen verschillen van deze omvang het verschil uitmaken het wel of niet voldoen aan de omgevingswaarden uit de Omgevingswet.
Dit is een wellicht wat onthutsend beeld, dat evenwel vaak genuanceerd wordt met de (veronder)stelling dat zelfs de meest optimistische geotechnische schematiseringen doorgaans conservatief zijn en conservatiever naarmate minder betrouwbare informatie beschikbaar is. Enige aanwijzing hiervoor kan overigens wel aan genoemd ringonderzoek worden ontleend. Hierbij is in drie verschillende fasen het grondonderzoek beschikbaar gesteld, namelijk eerst 'schaars', vervolgens 'normaal' en daarna 'ruim' (d.w.z. een groot deel van alle beschikbare onderzoeksgegevens die in het kader van de praktijkproef zijn ingewonnen). Op een enkele uitzondering na vertoonden de berekende stabiliteitfactoren een stijgende lijn toen de informatievoorziening van 'schaars' naar 'normaal' ging. Op een uitzondering na veranderden stabiliteitfactoren weinig toen daarna nog extra informatie beschikbaar werd gesteld. Dat dus in geval van schaars onderzoek 'voorzichtig conservatief' werd geschematiseerd lijkt niet onwaarschijnlijk.

Een probleem is overigens het expliciet zichtbaar maken van hoe conservatieve schattingen van de ondergrondopbouw tot stand komen. De vigerende opvatting is dat dit een proces van impliciete afwegingen is dat zich moeilijk laat omschrijven en zich derhalve ook niet leent voor min of meer eenduidige receptuur. Het is opmerkelijk dat in Leidraden, normen e.d. niet of nauwelijks wordt ingegaan op de wijze waarop schematisering van de ondergrondopbouw tot stand komt. De opbouw van de ondergrond wordt hierin doorgaans als een gegeven beschouwd.

Wanneer we het proces van impliciete afwegingen proberen te expliciteren komen we al gauw op een tijdrovend proces, waarin nog steeds niet of moeilijk kwantificeerbare stappen zitten, maar dat in elk geval structuur biedt. Om de gedachten te bepalen proberen we hieronder dat proces stapsgewijs te beschrijven, ook al wordt het (althans niet zichtbaar en zeker niet in de mate van het geschetste detail) in de praktijk zo toegepast.

Stap 1 Begin met een ruwe schets van de ondergrondopbouw (in een lengteprofiel) zoals die blijkens de beschikbare informatie aannemelijk is (best guess scenario). Dat wil dus zeggen een opbouw van grondlagen die consistent is met de beschikbare metingen, sonderingen en/of boringen (de harde informatie). Selecteer hierbij één of meerdere mogelijke representatieve dwarsdoorsneden en schematiseer binnen deze doorsneden de ondergrondopbouw, daarbij rekening houdend met de variaties die in lengterichting en in dwarsrichting kunnen voorkomen.

Stap 2 Vul deze schematisering aan met een voorlopige schematisering van de waterspanningen, de keuze van het rekenmodel en een eerste keuze van de grondparameters voor de stabiliteitsanalyse en maak een eerste berekeningsslag.

Stap 3 Inventariseer vervolgens kwalitatief welke onzekerheden over de (onder)grondopbouw een rol zouden kunnen spelen. Bijvoorbeeld: laagovergangen kunnen hoger of lager liggen dan in de eerste schematisering is aangenomen, slappe grondlagen kunnen dikker of dunner uitvallen ten koste/bate van sterkere grondlagen. Er kunnen, afhankelijk van de geologie van het gebied zandbanen voorkomen (die leiden tot opdrijven) of lenzen met slap materiaal etc.

Stap 4 Genereer op basis van die inventarisatie verschillende scenario's van de ondergrondopbouw die nog wel steeds consistent zijn met de harde informatie, aangevuld met zachte informatie (zoals het niet kunnen uitsluiten dat er een zandbaan is of een lens met slap materiaal). Voer voor elk van die scenario's de stabiliteitsanalyse uit. Dit levert een scala aan stabiliteitfactoren op, op basis waarvan de scenario's gerangschikt kunnen worden van optimistisch tot pessimistisch. Het idee dat bij de informatie uit een grondonderzoek meerdere scenario's van de ondergrondopbouw kunnen passen,

die alle consistent zijn met de beschikbare 'harde informatie', maar qua invulling kunnen verschillen op basis van 'zachte informatie' (geologische kennis, gebiedskennis, onzekerheden) is onder andere al voorgesteld in het kader van het onderzoek 'Probabilisme in de geotechniek' [Grondmechanica Delft, 1997].
Stap 5 Hoewel moeilijk hard aantoonbaar is het aannemelijk dat de meest pessimistische scenario's conservatieve schematiseringen zijn. Vervolgens kan daarom gekeken worden naar de (on)waarschijnlijkheid van deze scenario's. Dit moet bij voorkeur kwantitatief gebeuren, maar met de huidige kennis is dat slechts in beperkte mate mogelijk. Veelal zal men dus aangewezen zijn op kwalitatieve inschattingen van de waarschijnlijkheid van de scenario's. Voor een aantal specifieke inschattingsproblemen kunnen we gebruik maken van statistische methoden, zie o.a. de publicatie 'Optimaliseren grondonderzoek vraagt een heldere kansenanalyse' [Calle, 2002] en onderstaande voorbeelden 1 en 2.

Stap 6 De scenario's waarvan de waarschijnlijkheid uiterst klein is (praktisch onmogelijk) kunnen soms a-priori geëlimineerd worden. Van andere conservatieve scenario's, die dus kennelijk niet redelijkerwijs uitgesloten kunnen worden, kunnen we proberen na te gaan welke informatie nodig zou zijn om die toch met grote waarschijnlijkheid uit te kunnen sluiten. Hier ligt dus de link met toegevoegde waarde van aanvullende informatie-inwinning, waaronder aanvullend lokaal grondonderzoek.

Het resultaat is dat een aantal scenario's overblijft, gerangschikt van optimistisch naar conservatief, waarbij van alle kwalitatief of kwantitatief is vastgesteld hoe waarschijnlijk ze zijn en bij de (meest) conservatieve scenario's is nagegaan welke informatie nodig is om ze uit te kunnen sluiten.

Of het inwinnen van aanvullende informatie, om een conservatief scenario uit te sluiten, toegevoegde waarde biedt is in het algemeen afhankelijk van:

- De kosten van aanvullende informatie-inwinning, vaak additioneel lokaal grondonderzoek, en hiermee samenhangend.
- De kans dat dit onderzoek tot het gewenste resultaat leidt, namelijk uitsluiting van het scenario.
- De winst die geïncasseerd kan worden wanneer het scenario daadwerkelijk kan worden uitgesloten.

Het schatten van de kosten van aanvullende informatie-inwinning zal doorgaans weinig problemen leveren zo gauw de informatiebehoefte is gespecificeerd. Met de kans dat dit leidt tot uitsluiting van het scenario ligt dat moeilijker; veelal zal men zijn aangewezen op expert judgement. Voor specifieke omstandigheden is met behulp van Bayesiaanse kansrekening een kwantitatieve inschatting te maken, zie ook de publicatie 'Optimaliseren grondonderzoek vraagt een heldere kansenanalyse' [Calle, 2002]. De potentiële opbrengst van de aanvullende informatie-inwinning is het verschil tussen (life cycle) kosten van het ontwerp op basis van het meest conservatieve scenario en die van het ontwerp op basis van het meest conservatieve scenario dat niet meer beoogd wordt te worden geëlimineerd op basis van de aanvullende informatie. De verwachte opbrengst is de potentiële opbrengst, vermenigvuldigd met de kans dat de beoogde uitsluiting van conservatieve scenario's wordt gerealiseerd.

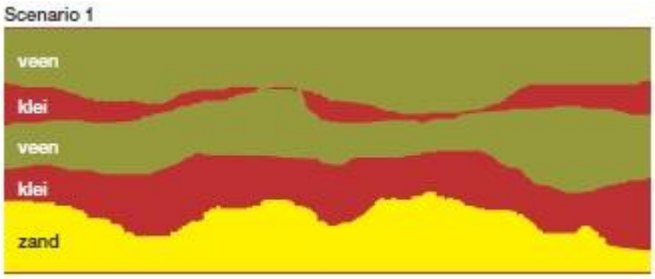
Het zal opvallen dat deze werkwijze sterke overeenkomsten vertoont met de werkwijze bij een risicoanalyse en het beslissen onder onzekerheden. In feite is dat natuurlijk ook wat een ervaren geotechnisch ingenieur impliciet doet (of zou moeten doen) bij het schematiseren van de ondergrond. De afwegingen en keuzebeslissingen worden alleen niet expliciet gemaakt maar globaal en kwalitatief op basis van ervaring en ingenieursgevoel. Voor een deel van de bovenbeschreven stappen geldt dat

nog steeds op basis van ervaring en gevoel moet worden gewerkt, omdat objectief en kwantitatief rekeninstrumentarium ontbreekt; alleen zijn in de boven gegeven stappenbeschrijving de afwegingen zichtbaar gemaakt.
Tot slot willen we aan de hand van twee specifieke situaties een kwantitatieve analyse beschrijven voor de afweging of aanvullend grondonderzoek vanuit een kosten / batenoptiek zinvol is. Het gaat hier niet om recepten die universeel toepasbaar zijn, maar eerder richtinggevende voorbeelden zijn die het denkpatroon illustreren.

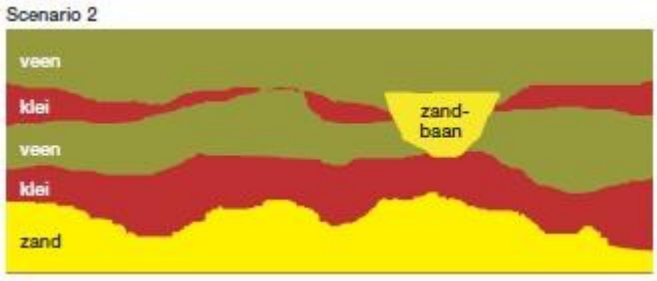
Voorbeeld 1: Aanwezigheid van een zandbaan

Stel, dat voor het beoordelen van een strekking van 2 km rivierdijk alleen globale informatie over de opbouw van de ondergrond beschikbaar is (bijvoorbeeld gebaseerd op informatie van TNO-NITG, voorheen de Rijks Geologische Dienst). Daaruit blijkt dat de 'main stream' opbouw vanaf het maaiveld bestaat uit een kleilaag van 6 tot 8 meter dikte, bovenop het vaste (pleistocene) zandpakket. Lokaal kan in de kleilaag, op basis van de geologie, de aanwezigheid van een zandbaan niet worden uitgesloten. Volgens inschattingen van de geoloog komen zandbanen van enige omvang gemiddeld ééns in de 10 km (gemeten langs de rivierdijk) voor. De a-priori kans op een zandbaan in de te beoordelen strekking van 2 km wordt derhalve op 0,20 geschat. Op grond hiervan komen we tot twee mogelijke scenario's voor de opbouw van de ondergrond, zoals geschetst in de figuren 1 en 2 (het aantal mogelijke scenario's is beperkt gehouden, omdat het hier om een illustratief bedoeld voorbeeld gaat).

De ondergrondopbouw volgens scenario 1 in figuur 1 lijkt geen problemen op leveren ten aanzien van de stabiliteit van het binnentalud van de dijk, bij een hoge rivierstand. De ondergrondopbouw volgens scenario 2 in figuur 2 mogelijk wel. Als er een zandbaan is, staat die hoogst waarschijnlijk in verbinding met de rivier. Bij hoge rivierstanden kunnen dan hoge waterspanningen in de zand ontstaan, die tot opdrijven van de lokaal aanwezige deklaag kunnen leiden. Omdat de kans relatief groot is dat in de strekking die we moeten beoordelen zo'n zandbaan niet werkelijk aanwezig is kunnen we lokaal grondonderzoek doen om de aanwezigheid binnen de dijkstrekking met voldoende betrouwbaarheid uit te sluiten. Indien bij dit onderzoek tegen de verwachting in wel een zandbaan wordt gevonden is het uiteraard zaak om de breedte dikte en diepteligging te traceren. Vervolgens kan met (voorzichtige) aannamen over de waterspanningsrespons in de zandbaan op toename van de rivierstand, nagegaan of er werkelijk opdrijfproblemen zijn te verwachten. Als dit zo is kan aan de hand van waterspanningrespons-metingen worden nagegaan in welke mate de zandbaan werkelijk reageert op veranderingen van de rivierstand.



Figuur 1 'Main stream' opbouw van de ondergrond (scenario 1)



Figuur 2 'Main stream' opbouw van de ondergrond met een lokale verstoring door een zandbaan (scenario 2)

De kosten/batenafweging die gemaakt moet worden is de volgende. Zonder nader lokaal grondonderzoek is de consequentie dat de dijkstrekking wordt afgekeurd op onvoldoende stabiliteit bij de rivierstand. Er zullen dus maatregelen noodzakelijk zijn. De kosten hiervan zijn goed in te schatten. De kans dat door grondonderzoek wordt aangetoond dat dit niet nodig is, is minimaal 0,8. Immers de kans dat er geen zandbaan zit in de dijkstrekking is 0,8 en als die er wel zit, is het afhankelijk van de breedte, de dikte en waterspanningsrespons op de rivierstand of dit leidt tot afkeuren. De verwachte besparing van het grondonderzoek is dus minimaal 0,8 keer de kosten van de maatregel minus de kosten van het grondonderzoek en de bijbehorende engineering. Verder is er een kans van maximaal 0,20 dat ondanks dit onderzoek toch (lokaal) een maatregel nodig is.

Het onderzoek om de aan- of afwezigheid van een zandbaan te bepalen kan bijvoorbeeld bestaan uit equidistant sonderen. In de publicatie 'Optimaliseren grondonderzoek vraagt een heldere kansenanalyse' [Calle, 2002] is de opzet van de kansenanalyse gegeven om na te gaan wat de onderlinge afstand zou moeten zijn om de aanwezigheid van een zandbaan met een bepaalde vereiste betrouwbaarheid uit te kunnen sluiten. Ter illustratie gaan we uit van de a-priori kans op een zandbaan van 0,20 in de dijkstrekking zoals boven verondersteld en de aanname dat zo'n zandbaan in verwachting 75 meter breed is met een normaal verdeelde spreiding waarvan de standaardafwijking 15 meter is.

Kiezen we een onderlinge afstand tussen de sondeerpunten van 150 meter, dan is de kans dat er toch een zandbaan zit, ook al wordt die niet ontdekt, nog altijd ongeveer 1/10. Kiezen we de onderlinge afstand 80 meter, dan blijkt die kans 1/100 te zijn en bij 60 meter 1/1000.

Voorbeeld 2: diepteligging overgang klei/veenpakket en watervoerende zandlaag

Hiervoor gaan we uit van de ondergrondopbouw volgens scenario 1 in de figuur. Bij voorbeeld 1 is verondersteld dat deze opbouw, en met name de onzekerheid over hoogteligging van de top van de pleistocene zandlaag, niet zou kunnen leiden tot een te lage veiligheid voor het mechanisme afschuiven bij een extreme waterstand. In voorbeeld 2 veronderstellen we dat dit mogelijk wel tot een probleem zou kunnen leiden.

Stel dat volgens beschikbare metingen in de regio de dikte van het klei/veen pakket, gemeten vanaf het maaiveld tot de top van het pleistocene zand, gemiddeld 10 m is met een standaardafwijking van 1,20 m en dat de gemeten waarden als normaal verdeeld kunnen worden opgevat. Dat betekent dat door de bank genomen de dikte varieert tussen de 8 en 12 m (90% betrouwbaarheidsinterval), met lokale uitschieters. Stel nu verder dat uit opdrijfanalyses zou blijken dat bij een dikte van minimaal 8 meter de kans op instabiliteit als gevolg van opdrijven voldoende klein is, maar bij kleinere dikten niet. Op basis van de beschikbare gegevens kunnen potentiële opdrijflocaties dus niet worden uitgesloten. Sterker, gegeven bepaalde aannames over de statistische karakterisering van de ruimtelijke variaties wordt een kans op tenminste één zo'n locatie berekend, die al gauw in de orde van 50% ligt. Met alle mogelijke consequenties van dien voor de overstromingskans. De

karakteristieke 5% ondergrens van de (lokale) pakketdikte binnen de beschouwde strekking van 2 km, rekening houdend met de ruimtelijke variabiliteit, kan ook berekend worden en is 6,75 m. Voor onderbouwing van deze getallen wordt verwezen naar Bijlage D [ENW, 2009].
We zoeken daarom naar een manier om de aanwezigheid van zo'n potentiële opdrijflocatie óf daadwerkelijk aan te tonen, of met voldoende betrouwbaarheid, zeg 95%, uit te sluiten. Dat kan bijvoorbeeld door met behulp van equidistant sonderen de hoogteligging van de onderkant van het klei/veen pakket te bemonsteren. Wanneer bij elke sondering gevonden wordt dat de pakketdikte bijvoorbeeld meer dan 10 m is, dan lijkt het vermoeden gerechtvaardigd dat de kans op een pakketdikte van minder dan 8 m tussen de meetpunten in klein is. Die kans is echter afhankelijk van de afstand tussen de meetpunten (in relatie tot de 'snelheid' waarmee de hoogteligging varieert). We kunnen ons voorstellen dat bij een sondeerafstand van 50 m die kans, gegeven genoemde uitkomst van de meting, veel kleiner is dan bij een sondeerafstand van 150m of meer. Met behulp van een geostatistische analyse kan een (ruwe) schatting worden gemaakt van de kans op het vóórkomen van een pakketdikte van minder dan 8 meter, gegeven de sondeerafstand en gegeven de bij de sonderingen gevonden minimale pakketdikte.

Op basis van zo'n berekening kan omgekeerd ook gekeken worden bij welke sondeerafstand en de bij de meting gevonden minimale pakketdikte, de kans op voorkomen van een locatie met pakketdikte van minder dan 8m kleiner is dan 5% (en dus met 95% betrouwbaarheid kan worden uitgesloten).

In onderstaande tabel zijn de uitkomsten van zo'n rekenexercitie weergegeven. Daarbij is uitgegaan van drie veronderstellingen ten aanzien van de gevonden minimale pakketdikte bij de meting, namelijk 8,5, 9,0 en 9,5 meter. Verder zijn drie aannamen gedaan voor de auto-correlatieparameter (D_h= 50, 100 en 150 m). Dit is de parameter die in het geostatistische model voor ruimtelijke variatie van de pakketdikte de 'snelheid' van variatie karakteriseert. Voor een nadere toelichting op deze berekening zie Bijlage D uit [ENW, 2009].

Gevonden minimale pakketdikte bij sonderen [m]	Correlatieparameter D_h		
	D_h = 50m	D_h = 100m	D_h = 150m
8,5	20	40	60
9,0	45	90	135
9,5	90	180	270

Statistisch model voor diktevariaties voor klei/veenpakket:

- autocorrelatiefunctie: $\rho(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau}{D_h}\right)^2}$
- verwachtingswaarde: $\mu = 10$ m
- standaardafwijking: $\sigma = 1{,}20$ m

waarin D_h = de autocorrelatie parameter (resp. 50, 100 en 150 m)

Tabel Sondeerafstanden waarbij de kans op voorkomen van een pakketdikte kleiner dan 8 m minder dan 5% is als functie van de gevonden minimale pakketdikte bij sonderen

Uiteraard moeten bij de statistische berekeningen aannamen worden gedaan over het te hanteren statistische model en de parameters. Hoewel hierover natuurlijk altijd discussie mogelijk is, stellen we vast dat vooralsnog alleen met een geostatistische analyse een kwantitatieve uitspraak mogelijk is. Een sleutelparameter in het statistische model is de correlatieparameter D_h. Tegelijk is dit ook de grote onbekende. De snelheid van variatie kunnen we ruw karakteriseren door, bijvoorbeeld, de

gemiddelde afstand tussen twee opvolgende toppen van de bovenkant van de zandlaag in de figuur. De relatie tussen die gemiddelde afstand L_{gem} en de correlatieparameter D_h is beschreven in 'Measuring Spatial Correlation of Soil Properties' [Vrouwenvelder, 2003]:
Formule die de correlatieparameter D-subscript h beschrijft als functie van de gemiddelde afstand.

$$D_h \approx \frac{L_{gem}\sqrt{2}}{\pi} \approx 0.45\, L_{gem}$$

Uit bovenstaande blijkt dat we theoretisch alleen achteraf, wanneer we weten wat de minimale gevonden klei/veenpakketdikte is bij het sonderen, kunnen vaststellen of de sondeerafstand klein genoeg was gekozen. Uitgaande van het statistische model kunnen we wel vooraf bepalen of de kans op het aantreffen van een pakketdikte (bij het sonderen) van kleiner dan 8,5 meter erg groot is (meer dan 50%). Dit houdt ook in dat als we in dit geval een 'gebruikelijke' sondeerafstand van 100 m kiezen, er een grote kans is dat we (achteraf) moeten constateren dat die afstand te optimistisch gekozen was. Om die reden kunnen we het best van meet af aan kiezen voor een kleinere sondeerafstand.

De afweging die nu gemaakt moet worden is of de kosten van het grondonderzoek opwegen tegen de verwachte winst, als we er door dit grondonderzoek in slagen een pakketdikte kleiner dan 8mmet voldoende betrouwbaarheid uit te sluiten. De besparing, als het onderzoek positief uitvalt, namelijk dat een klei / veenpakketdikte kleiner dan 8m met 95% betrouwbaarheid kan worden uitgesloten, kan redelijk goed afgeschat worden en kan substantieel zijn. De kans dat het onderzoek positief uitvalt kan ook vooraf geschat worden en is 50 à 70%, afhankelijk van de 'snelheid' van variatie en dus de correlatieparameter D_h. De bruto opbrengstfactor van het onderzoek is dus 0,5 à 0,7 keer de besparing gedeeld door de kosten van het onderzoek. In dit geval is er ook een flinke kans dat het onderzoek niet het gewenste resultaat oplevert (30 à 50%). Daarom zal, afhankelijk van de kosten van het onderzoek, een hoge eis aan de bruto opbrengstfactor worden gesteld (deze heeft een ondergrenswaarde 1 in geval van risico-neutrale beslissing en kan afhankelijk van de mate van risico-aversie van de beslisser beduidend groter zijn dan 1).

De analyses zoals gegeven in de voorbeelden 1 en 2 staan in de literatuur bekend als de zogenaamde pre-posterior cost benefit approach, zie o.a. 'Framework for Risk Assessment and Evaluation' [Kroon, 2004]. Kenmerk van deze benadering is dat voor de afweging van risicoreducerende (= onzekerheid reducerende) maatregelen de beoogde effecten van die maatregelen en de kansen dat die worden gerealiseerd, worden afgewogen tegen de kosten van die maatregelen. De moeilijkheid bij deze analyses zit doorgaans in het vooraf bepalen van de kansen dat de maatregelen (vaak 'nader onderzoek') het beoogde effect daadwerkelijk realiseren.

Versie 1.0: 2 juli 2025

2.4 Schematiseren van de ondergrond

Introductie stochastische ondergrondschematisatie (SOS)

De stochastische ondergrondschematisatie (SOS) is een toepassingsonafhankelijke ondergrondschematisatie en kan na een lokale verfijnslag gebruikt worden voor de veiligheidsanalyse van waterkeringen voor alle geotechnische faalmechanismen. De functie van SOS is hierin het toeleveren van informatie over de opbouw van de ondergrond en het herkennen en identificeren van relevante ondergrondlagen. Daarnaast helpt SOS ook bij het eenduidig toewijzen van waarden voor grondparameters. Samen met inzicht in de werking van en invloeden op faalmechanismen kan met de SOS informatie een verantwoorde lokale schematisatie van de ondergrond worden opgesteld

Voor alle primaire waterkeringen in Nederland is, afgezien van de duinen, de globale Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS) opgesteld. Bij het opstellen van SOS zijn, op basis van bekende informatie over de ondergrond, de primaire keringen opgedeeld in segmenten. In een SOS segment komen één of meerdere SOS-ondergrondscenario's voor met een bepaalde kans van aantreffen. De SOS-scenario's leggen de opbouw van de ondergrond vast met een opeenvolging van SOS-eenheden en de diepteligging van die eenheden. De diepteligging wordt gegeven met een representatieve (modale) diepte en indicaties van de minimale en maximale diepteligging van de eenheden. Het aantal scenario's per segment is wisselend en hangt af van de lengte van het segment en complexiteit van de opbouw. In veel gevallen zijn er 4 - 8 scenario's toegekend, maar in sommige gevallen zijn er 16 - 20 scenario's van toepassing. Onderstaande figuur geeft een voorbeeld van de SOS informatie die beschikbaar is voor een bepaald segment.

Deze informatie is binnen het programma D-Soil Model beschikbaar. In [Hijma, 2015] wordt in detail beschreven hoe de SOS is opgezet en waaruit de SOS bestaat.

De SOS geeft geen informatie over de opbouw van het dijklichaam. De opbouw van het dijklichaam moet worden geschematiseerd op basis van lokale gegevens.



Figuur 1 Overzicht van de informatie die de SOS verschaft. In dit voorbeeld zijn zeven scenario's onderscheiden met een kans van aantreffen. Het bovenste tableau geeft per scenario van elk van de onderscheiden grondlagen de modale, minimum en maximum diepteligging weer. Het tableau

linksonder is een weergave ‘op schaal’ van de grondlagen in de zeven scenario’s, het tableau rechtsonder geeft een situatieschets met beschikbare grondonderzoekspunten
De werkwijze met scenario’s is opgezet omdat in vrijwel alle gevallen de hoeveelheid puntwaarnemingen, zoals sonderingen en boringen, niet voldoende is om met voldoende zekerheid de ondergrond te kunnen schematiseren voor de beoordeling op een faalmechanisme. De opbouw van de ondergrond kan namelijk heel variabel zijn over korte afstanden. Met een stochastisch ondergrondmodel wordt deze onzekerheid in rekening gebracht en worden alle mogelijke relevante scenario’s bepaald. Het stochastisch ondergrondmodel is opgesteld op basis van feitelijke gegevens, zoals sonderingen en boringen uit de DINO-database, en op basis van geologische kennis over de ontstaansgeschiedenis van een gebied.

Op basis van het globale SOS-model moet aan de hand van lokaal grondonderzoek, zoals boringen en sonderingen, een lokale ondergrondschematisatie worden opgesteld, in principe nog steeds een stochastisch model tenzij er zo gedetailleerd grondonderzoek beschikbaar is dat alle scenario’s behalve één met zekerheid uit te sluiten zijn. Voor ieder faalmechanisme moet de focus daarbij liggen op een ondergrondschematisatie die relevant is voor het betreffende mechanisme.

De werkwijze waarmee de SOS kan worden toegepast voor het opstellen van een lokale ondergrondschematisatie voor het betreffende dijkvak met bijbehorende scenariokansen is uitgewerkt in de Handleiding lokaal schematiseren met SOS [Kruse, 2015].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Schematiseren van de ondergrond

Bij het schematiseren van de ondergrond wordt de beschikbare informatie over de grondopbouw verwerkt tot een ondergrondmodel waarin het vóórkomen van verschillende grondlagen of afzettingen schematisch wordt weergegeven. Het gaat daarbij zowel om het dijklichaam zelf als de ondergrond, al dan niet natuurlijk, waarop deze rust. Van de verschillende grondlagen die zich van elkaar onderscheiden door specifieke eigenschappen, wordt het niveau aangegeven (meestal ten opzichte van NAP) waarop de grondlagen voorkomen. Wanneer alleen geologische afzettingen of formaties zijn weergegeven, is sprake van een geologisch model, zie ook Geologische beschrijving ondergrond. Wanneer onderscheid is gemaakt naar geotechnische kenmerken van de ondergrond kan worden gesproken van een geotechnisch ondergrondmodel. In onderstaand artikel wordt daar verder op ingegaan.

Inleiding

Het eerste uitgangspunt voor het ondergrondmodel is de globale Stochastische Ondergrondschematisatie (SOS). Deze is voor alle primaire waterkeringen in Nederland opgesteld. In een stochastische ondergrondschematisatie worden de verschillende mogelijkheden (scenario’s) beschreven voor de opbouw van de ondergrond die zich op een locatie kunnen voordoen. De ondergrondscenario’s in het SOS zijn opgesteld voor de natuurlijke ondergrond, uitgaande van een onbelaste situatie. Van belang is te bedenken dat de laagopbouw onder de dijk weliswaar hetzelfde verondersteld mag worden als in de omgeving, maar zal afwijken in laagdiktes en materiaaleigenschappen.

Op basis van de reeds beschikbare lokale informatie en/of gegevens uit aanvullend lokaal grondonderzoek worden deze generieke SOS-scenario’s verder gedetailleerd in diepteligging en uitgestrektheid van de lagen. Sommige scenario’s kunnen op basis van de lokale grondgegevens worden uitgesloten, andere kunnen worden verfijnd met sub-scenario’s. De werkwijze om het generieke SOS te verfijnen voor de lokale omstandigheden is uitgewerkt in de handleiding SOS.

Van de onderscheiden lagen dienen de laageigenschappen te worden vastgesteld. Het artikelen Bepalen van grondeigenschappen, gaat hier uitgebreid op in.

Globale werkwijze bij schematiseren

In deze paragraaf worden verschillende stappen beschreven die doorlopen worden om te komen tot schematiseringen van een of meer representatieve opbouw van de ondergrond van de dijk in een beschouwde dijkstrekking. Deze stappen zijn:

1. Karakterisering van de ondergrondopbouw in de omgeving van de dijk.
2. Geohydrologische karakterisering.
3. Geotechnische schematisering.
4. Keuze representatieve opbouw van de ondergrond.

De volgende sub-paragrafen beschrijven deze stappen.

Overigens is voor het opstellen van de globale stochastische ondergrond schematisatie (SOS) stap 1 en 2 al doorlopen. De toekenning van een bereik van geotechnische parameter-waarden aan de onderscheiden lagen, die in sommige gevallen ook onderdeel uitmaakt van SOS, is op een globaal niveau, feitelijk stap 3.

Karakterisering van de ondergrondopbouw in de omgeving van de dijk

Deze karakterisering dient om inzicht te krijgen in de voorkomens van grondlagen en (onder)grondopbouw-typen die relevant zijn voor de verschillende potentiële faal- of bezwijkmechanismen van de dijk. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de aanwezigheid van zandbanen, kleilenzen, grindbanken enz. Deze verschijnselen kunnen lokaal van aard zijn en zo beperkt van omvang dat ze bij 'normaal' grondonderzoek in de directe omgeving van de dijk (bijvoorbeeld sonderingen om de 100 meter) niet worden opgemerkt. Deze karakterisering verschaft handvatten om, ook wanneer dit niet uit het 'normale' grondonderzoek bij de dijk zelf blijkt, met de mogelijke aanwezigheid ervan toch rekening te houden bij de schematisering van de dijk en de directe ondergrond.

Verder dient deze karakterisering om een beeld te krijgen van de geohydrologische systematiek in de ondergrond. Van belang hierbij is dat onderkend wordt welke factoren in de omgeving van de dijk invloed kunnen hebben op de voor de stabiliteit relevante waterspanningsopbouw in en om de dijk. Denk hierbij aan respons van grondwaterstanden en grondwaterspanningen op de buitenwaterstand en peilbeheer binnendijks, maar bijvoorbeeld ook aan zaken in de omgeving als zandwinning (binnendijks), grondwateronttrekking, afgravingen in het voorland, baggerwerkzaamheden in een rivier, enz.

Het resultaat van deze schematiseringstap is dat een (globaal) beeld wordt verkregen van de bodemopbouw in de omgeving van de dijk en geohydrologische systeemkenmerken. Precieze ligging, dikte en eigenschappen van grondlagen of grondpakketten zijn nog niet van belang, die komen in de volgende stappen aan de orde.

De informatie die hierbij gebruikt wordt is divers van aard. Als al grondonderzoek ter plaatse van de dijk beschikbaar is, is dat een aanvulling die detaillering toevoegt aan gebiedservaring of kennis van de geologie van het gebied.

Gegevensbestanden met boringen en/of sonderingen in de omgeving (BRO, voorheen DINO-database) zijn onmisbare informatiebronnen voor het globale beeld van de ondergrondopbouw. Gebiedservaring en/of kennis van de geologie van het gebied zijn ook richtinggevend bij het vaststellen van de mogelijke aanwezigheid van lokale verschijnselen of

structuren in de ondergrond in de directe omgeving van de dijk, die van belang kunnen zijn. Hiermee kan dan bij het opzetten van het grondonderzoek rekening gehouden worden.
Mogelijk is de uitkomst niet een (min of meer) eenduidige karakterisering, maar zijn er door ontbrekende informatie meerdere (essentieel verschillende) mogelijkheden. Deze moeten meegenomen worden bij de verdere schematiseringstappen.

Geohydrologische karakterisering

Op basis van de geïdentificeerde geohydrologische systeemkenmerken in de vorige stap moet de geohydrologische schematisering verder worden uitgewerkt. Veelal gaat het om waterspanningen in zandlagen onder de dijk die bij de binnenteen voor opdrijven of opbarsten zouden kunnen zorgen. Maar ook om het verloop van waterspanningen (verticaal) over klei- en veenpakketten en/of stijghoogtes in het dijklichaam, voor zover die via grondwaterstroming door de ondergrond ontstaan.

De geohydrologische karakterisering is een schematisering van lagen die watervoerend zijn (zandlagen) en slecht doorlatende pakketten (klei en veenlagen). Van de watervoerende lagen moet aangegeven worden hoe deze beïnvloed worden door het buitenwater en hoe dit doorwerkt op het waterspanningsbeeld in de dijk en de omgeving. Daarbij moet uiteraard rekening worden gehouden met de 3D configuratie van de lagen. In de slecht doorlatende deklagen en scheidende lagen wordt in de regel geen horizontale grondwaterstroming verondersteld, wel verticale grondwaterstroming door potentiaalverschillen tussen watervoerende lagen boven en onder de slecht doorlatende scheidende laag of potentiaalverschillen tussen een watervoerende laag en het freatisch vlak. Doel van de geohydrologische schematisering is primair het in beeld brengen van de mogelijke invloed van (veranderingen van) open waterpeilen en grondwaterpeilen in de omgeving op de ontwikkeling van waterspanningen in en nabij de dijk. Op basis van de geohydrologische schematisering kunnen rekenmodellen voor grondwaterstroming worden gekozen om de waterspanningen in de extreme situaties te berekenen of aan de hand van metingen te schatten (bijvoorbeeld extrapolatie van een meting van de getijderespons).

De benodigde mate van detail van de schematisering is afhankelijk van de rekenmodellen die men wil toepassen. Detailinformatie wordt ontleend aan:

- Boringen en sonderingen (voor het classificeren en schatten van de dikte van grondlagen).
- Eventueel waterspanning-responsmetingen in de zandlagen, om te verifiëren of en in welke mate deze communiceren met het oppervlaktewater.
- Soms waterspanningsmetingen in slecht doorlatende lagen.

Net als voor de globale karakterisering van de ondergrondopbouw geldt dat de geohydrologische karakterisering in de lengterichting van de dijk variabel kan zijn. Verder geldt ook dat de beschikbare informatie niet toereikend kan zijn om tot een eenduidig geohydrologische karakterisering te komen. Met additioneel grondonderzoek (bijvoorbeeld metingen van waterspanningen) kan dan geprobeerd worden wel een eenduidig(er) beeld te verkrijgen. Maar ook dan kunnen verschillende mogelijkheden overblijven. Die moeten worden meegenomen in het verdere schematiseringproces.

In het artikel Rekenprogramma's grondwaterstroming is een overzicht van de rekenmodellen voor grondwaterstroming in dijken en ondergrond gegeven. In het artikel Eerste schatting van waterspanningen worden recepten voor eenvoudige schematisering, een eerste schatting van waterspanningen in en onder de dijk aangedragen.

Geotechnische schematisering

Op het schaalniveau van de dijk en de voor de stabiliteitsanalyses relevante directe ondergrond moeten de ruwe schematiseringen die uit stap 1) en 2) komen verder worden gedetailleerd en

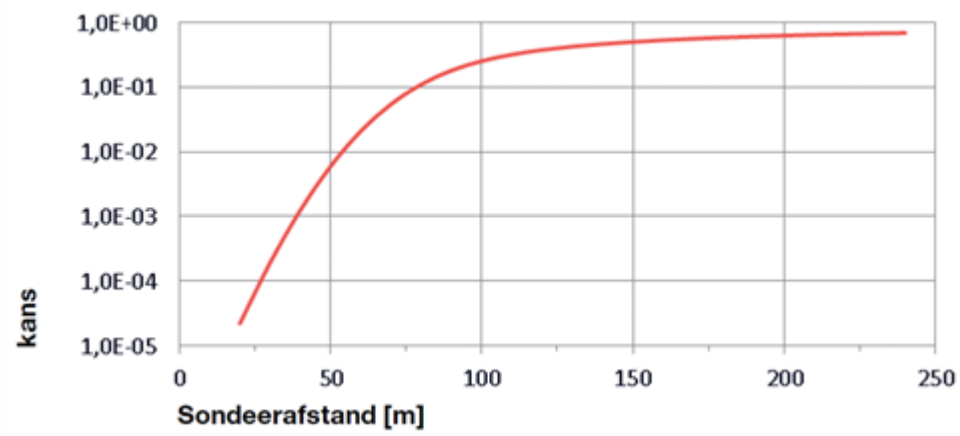
voorzien van relevante geotechnische parameterwaarden. Dit noemen we de geotechnische schematisering. Deze bestaat uit een min of meer driedimensionaal beeld van het verloop van grondlagen (in de diepte, in de richting loodrecht op de dijk en in de lengterichting ervan). Meer gedetailleerde informatie over ligging en dikte van de grondlagen is hierbij wel van belang, omdat de stabiliteitsanalyses daar gevoelig voor zijn. Verder moet aan de hand van de geohydrologische karakterisering een beeld worden afgeleid van de binnen die grondlagen heersende waterspanningen. Idealiter moet het op grond van deze schematisering mogelijk zijn op elke locatie in de lengterichting van de (beschouwde strekking van de) dijk een dwarsprofiel te genereren van dijk en ondergrond. Hierin zijn grondlagen en/of andere grondeenheden, en hierin optredende waterspanningen onder extreme condities vastgelegd.
Nadere detaillering van de opbouw van dijk en ondergrond en toekennen van geotechnische parameterwaarden aan de grondlagen in deze schematiseringstap moet op basis van grondonderzoek. Uitgangspunt hiervoor zijn boringen en sonderingen verdeeld over de lengterichting van de dijk. Aan de hand van de geïnterpreteerde boringen en sonderingen wordt een eerste beeld van de aanwezigheid van verschillende grondlagen en het verloop ervan in de lengterichting van de dijk geconstrueerd.

Van de in stap 1 geïdentificeerde in het gebied aanwezige geologische structuren van beperkte afmeting, zoals zandbanen of kleilenzen, moet worden nagegaan of deze ook in de gedetailleerder geotechnische schematisering direct bij de dijk een rol kunnen spelen. De mogelijkheid bestaat, bijvoorbeeld, dat zandbanen of kleilenzen in de ondergrond nabij de dijk aanwezig kunnen zijn, gezien het voorkomen in de omgeving, maar dat die niet aan het licht gekomen zijn bij het grondonderzoek.

In figuur 2 is, ter illustratie, de kans weergegeven dat bij sonderingen een in de ondergrond aanwezige lens met slap bodemmateriaal niet wordt opgemerkt, als functie van de afstand tussen de sondeerpunten in een raai in de lengterichting van de dijk. Hierbij is uitgegaan van een normaal verdeelde breedte van de lens, met een verwachtingswaarde van 75 meter en een standaardafwijking van 15 meter.

De afmetingen van zo'n lens zijn in elk geval relevant voor de taludstabiliteit van een dijk. We zien in deze figuur dat bij een zeer gebruikelijke sondeerafstand van 100 meter zo'n lens, indien aanwezig, met een kans van 10% door deze sonderingen niet wordt opgemerkt. De figuur is ontleend aan het tijdschriftartikel Optimalisatie Grondonderzoek vraagt heldere Kansenanalyse.

Dit kan betekenen dat wanneer op grond van de gebiedskarakterisering in stap 1 is vastgesteld dat lenzen van deze afmetingen kunnen voorkomen, er bij de geotechnische schematisering rekening mee gehouden moet worden dat die mogelijk ook onder of vlakbij de dijk aanwezig kunnen zijn, ondanks dat de sonderingen dit niet aangeven. In principe geldt dit ook voor andere geologische structuren van beperkte afmeting en de ligging in horizontale richting van begrenzingen van lagen. De kans daarop is afhankelijk van de dichtheid van voorkomen van die structuren in het gebied en is niet altijd even gemakkelijk te schatten.



Figuur 2 Kans op 'missen' van een lens met slap bodemmateriaal als functie van de sondeerafstand bij equidistante sonderingen. Ontleend aan [Calle, 2002]

Het is dus meestal het geval dat de beschikbare informatie niet leidt tot één eenduidige geotechnische schematisering, maar tot meerdere mogelijke schematiseringen.

Keuze representatieve opbouw van de ondergrond

Aan de hand van de geotechnische schematisering(en) moeten keuzes gemaakt worden voor de opbouw van de ondergrond die representatief is voor het ontwerpen van een dijk(versterking) of het beoordelen van de veiligheid van een bestaande dijk. Zoals gezegd kunnen de opbouw van de dijk en de ondergrond, maar ook waterspanningen in de dijk en de ondergrond variëren in de lengterichting van de dijk. Bovendien zijn er onzekerheden in de opbouw van de ondergrond, die in de analyse meegenomen dienen te worden.

Een arbeidsintensieve maar wel doeltreffende aanpak is om de dijkstrekking in secties te verdelen, waarvoor op basis van de hierboven beschreven schematiseringen een dwarsprofiel van de dijk, de ondergrondopbouw en de hierin heersende water(over)spanningen, behorende bij de extreme hydraulisch belastingen, te bepalen. Met informatie over de grondeigenschappen binnen de onderscheiden grondlagen kunnen dan voor elk van de secties een of meer stabiliteitsanalyses worden uitgevoerd. Representatief voor het op te stellen (dijkversterking)ontwerp, of voor een veiligheidsbeoordeling, is de opbouw van de ondergrond met de kleinste stabiliteitsfactor.

Deze aanpak vergt in beginsel stabiliteitsberekeningen voor alle in de lengterichting van de dijk onderscheiden 'typische' opbouwen van de ondergrond. Doorgaans zal het voor een ervaren ontwerper mogelijk zijn een (groot) deel van de opbouwen van de ondergrond al bij voorbaat op basis van kwalitatieve beoordeling als niet dominant te kwalificeren. Een algemeen recept hiervoor is echter niet te geven. Het systematisch zoeken, door alle secties 'door te rekenen' leidt in ieder geval tot een bruikbaar resultaat.

In de praktijk zal het keuzeproces een mengvorm zijn van kwalitatieve beoordeling en systematisch zoeken.

Benodigde informatie bij het schematiseren; grondonderzoek

Voor het opstellen van schematiseringen is informatie nodig. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen:

1. Een eerste opzet van de schematisering(en).
2. Het verfijnen van de schematisering(en).

Bij een eerste opzet zal doorgaans gebruik gemaakt worden van al beschikbare informatie, aangevuld met 'standaard grondonderzoek' (Strategie opzet grondonderzoek). Bij Nederlandse dijken is er vrijwel nooit sprake van een volledige afwezigheid van informatie over de opbouw van de dijk en de ondergrond. De omstandigheid dat alle informatie 'van scratch' af ingewonnen moet worden met alleen technieken voor grondverkenning zal zich dus niet gauw voordoen. Informatie op basis waarvan inzicht kan worden verkregen over de opbouw van het dijklichaam en de ondergrond in de omgeving van de dijk (en de variatie ervan in de lengterichting) kan ontleend worden aan:

- Archiefinformatie, zoals oude bestekken voor de bouw en latere verhogingen of versterking. Doorgaans zal die slechts beschikbaar zijn voor ingrepen die betrekkelijk recent (tot, pakweg, 50 à 70 jaar geleden) zijn uitgevoerd. Informatie over ingrepen van vóór die tijd is vaak niet aanwezig of kan, zo er al gedocumenteerd is, verloren zijn gegaan of ontoegankelijk geworden.
- Beheersinformatie over onderhoudsingrepen en geobserveerd gedrag bij hoge waterstanden in het recente verleden (decennia), en informatie over zettinggedrag.
- Gedocumenteerde informatie over grondonderzoeken (boringen en/of sonderingen, eventueel geo-elektrisch onderzoek en metingen van respons van waterspanningen) die in het verleden zijn uitgevoerd t.b.v. dijkversterking of -beoordeling. Bij een eerste opzet kunnen ook grondonderzoeken in de omgeving van de dijk als informatiebron dienen.
- Voor wat betreft de opbouw van de ondergrond: basisinformatie uit geologische / geohydrologische databases (SOS, BRO, DINO, grondwaterkaarten) in combinatie met interpretatie van deze informatie door een geoloog met gebiedskennis.
- Doorgaans ook: grondonderzoek volgens een 'standaardopzet' (Basisopzet van grondonderzoek).

Voor alle bronnen geldt dat ze in beginsel fragmentarische informatie leveren. Dit is kenmerkend voor grondmechanisch onderzoek. De verschillende informatiebestanddelen zijn als puzzelstukjes die door combineren gezamenlijk bijdragen tot het ontstaan van een totaalbeeld.

Wanneer een eerste opzet van de schematisering of mogelijke schematiseringen verkregen is, kan, door hier kritisch naar te kijken worden geïnventariseerd of, en zo ja, welke onzekerheden hierin nog een rol kunnen spelen. Voorbeelden zijn:

- Kan een grondlaag die (mogelijk) ongunstig is voor de stabiliteit van de dijk, bij het grondonderzoek over het hoofd zijn gezien?
- Kan een zandbaan die ogenschijnlijk achter de dijk ophoudt niet elders onder de dijk doorlopen en daardoor toch in verbinding staan met de rivier?
- Wat gebeurt er met de freatische lijn als de drainage in de binnenteen niet of onvoldoende werkt?
- Bij onder de dijk 'uitwiggende': grondlagen: tot hoever lopen ze door en wat is de invloed op de stabiliteit?

Die inventarisatie van onzekerheden levert de (bij voorkeur alle) mogelijk geachte, of niet uit te sluiten, afwijkingen van de eerste opzet van een schematisering op, die relevant zijn voor de controle op het beschouwde faalmechanisme.

Wanneer een mogelijke afwijking een groot nadelig effect kan hebben op de veiligheid tegen het beschouwde mechanisme en de kans er op relatief groot wordt geschat, dan kan worden besloten om deze onzekerheid door gericht nader grondonderzoek al op voorhand te elimineren of reduceren. De verwachting is dan immers dat de schematisering-analyse, die in Schematiseringsfactor voor afschuiven beschreven wordt, de noodzaak of wenselijkheid hiervan zal aantonen.

Het resultaat van de analyse is dat een verzameling verschillende (mogelijk geachte, van waarschijnlijk tot 'niet uit te sluiten') schematiseringen wordt verkregen waarmee de schematiseringanalyse, zoals beschreven in het artikel Schematiseringsfactor voor afschuiven, verder wordt uitgevoerd.

In de artikelen Strategie opzet grondonderzoek en Basisopzet van grondonderzoek wordt nader ingegaan op de opzet van grondonderzoek in het algemeen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Onzekerheid in schematisering ondergrond in rekening brengen

Bij het schematiseren van de ondergrond is er sprake van onzekerheden waar bij het maken van een faalkansanalyse rekening mee moet worden gehouden. Voor het rekening houden met de onzekerheid in de schematisering zijn twee methoden in gebruik waar de volgende paragrafen op ingaan:

1. Onzekerheid opbouw ondergrond in rekening brengen met basisschematisering en schematiseringsfactor.
2. Onzekerheid opbouw ondergrond in rekening brengen met scenario's.

De eerstgenoemde methode wordt veel gebruikt voor ontwerpen, de tweede methode is ontwikkeld voor de wettelijke beoordeling.

Onzekerheid opbouw ondergrond in rekening brengen met basisschematisering en schematiseringsfactor

Als gevolg van onzekerheden over de opbouw van de ondergrond zijn er meer schematiseringen voor ondergrondopbouw en waterspanningen mogelijk. Hieruit moet een keuze worden gemaakt voor de schematisering die als uitgangspunt voor de veiligheidsanalyse wordt genomen, we noemen dat de basisschematisering. NB. dergelijke verschillende schematisaties worden veelal aangeduid met de taalkundig niet geheel juiste term: scenario's.

In een ontwerpsituatie lijkt het voor de hand liggend om als basisschematisering voor het meest conservatieve scenario te kiezen. Het meest conservatieve scenario is de schematisatie waarbij de berekende veiligheid (bijvoorbeeld de stabiliteitsfactor) van een bestaande dijk of een dijkontwerp het laagst is. Dat is in ieder geval een veilige keuze. Maar, wanneer de waarschijnlijkheid van dit scenario erg klein is ten opzichte van de andere, minder conservatieve, scenario's, kan dit leiden tot een onnodig duur ontwerp. In dat geval kan men ook kiezen voor een minder conservatief scenario als basisschematisering. Maar er moet dan wel rekening mee worden gehouden dat de werkelijkheid in principe ongunstiger kan zijn dan die basisschematisering. Dat betekent dat een ontwerp, uitgaande van zo'n basisschematisering, onvoldoende veilig kan zijn (minder veilig dan vereist).

In het geval het om de beoordeling van een bestaande dijk gaat, kan de keuze van de meest conservatieve schematisering leiden tot een te hoge inschatting van de overstromingskans. Aan de andere kant zou de keuze voor een minder conservatieve schematisering kunnen leiden tot een onderschatting. In het artikel Voorbeeld schematiseringsfactor voor afschuiven wordt dat geïllustreerd met een rekenvoorbeeld.

Bij de keuze van de basisschematisering uit een set van mogelijke of denkbare schematiseringen zullen afwegingen moeten worden gemaakt. Daarin spelen de kansen dat de verschillende mogelijkheden de werkelijkheid representeren een rol, evenals de mate waarin de verschillende mogelijke keuzen (naar verwachting) leiden tot verschillen in de berekende veiligheid. Met de schematiseringanalyse, die in het artikel Schematiseringsfactor voor afschuiven beschreven wordt, wordt een instrument aangereikt waarmee dit keuzeproces inzichtelijk gemaakt kan worden. De

schematiseringfactor speelt daarbij een belangrijke rol.

Onzekerheid opbouw ondergrond in rekening brengen met scenario's

Het SOS en aanvullend lokaal grondonderzoek leidt tot verschillende schematisaties van de ondergrond die alle een bepaalde kans van voorkomen hebben. Deze schematisaties worden aangeduid als scenario's. Een stabiliteitsberekening, gegeven een schematisatie en de daarbij behorende waterspanningen, levert een berekende faalkans. Door voor alle relevante scenario's het product van faalkans en kans van voorkomen te sommeren verkrijgt men een gewogen faalkans voor het betreffende dijkvak.

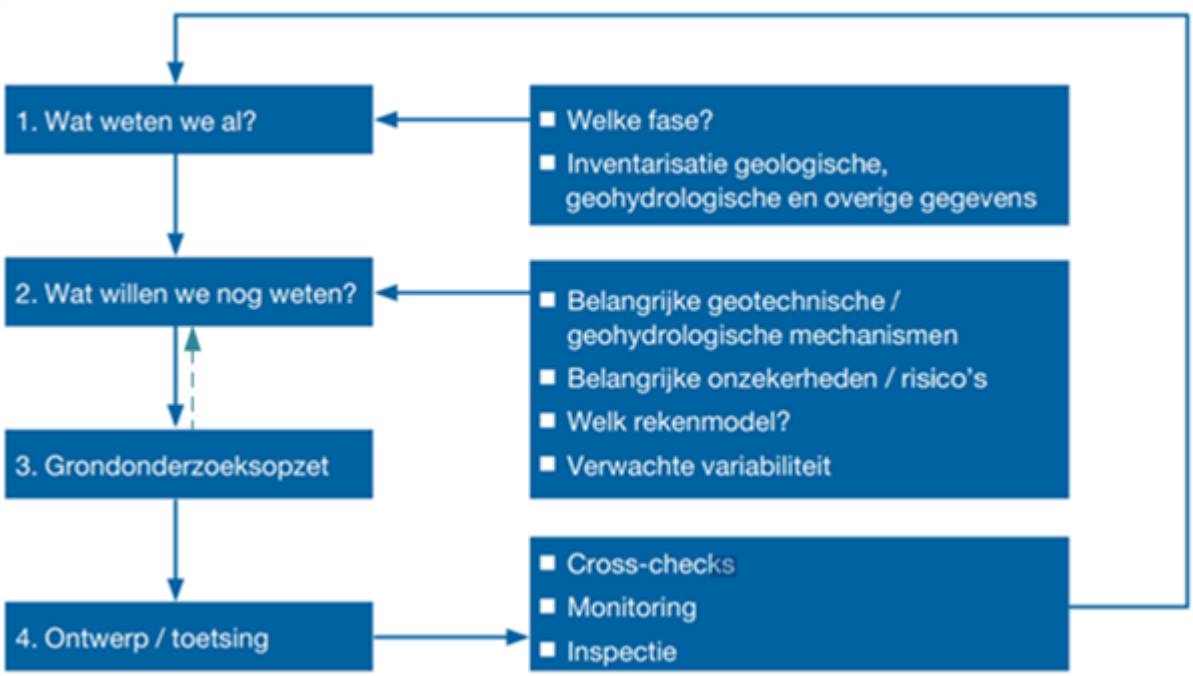
Versie 1.0: 2 juli 2025

Meet- en onderzoekstrategie voor de grondopbouw (inclusief dichtheid)

Op basis van beschikbare informatie, zoals bestektekeningen, revisietekeningen, sonderingen en boringen kan de grondopbouw of dijkopbouw worden geschematiseerd. Een dijk kan bijvoorbeeld bestaan uit een oude dijk van klei en een recentere aanvulling van zand. Ook kan hieruit informatie worden verkregen over de aanwezigheid van drainageconstructies of andere bijzonderheden. In verband met het toekennen van grondlaageigenschappen en het schematiseren van de waterspanningen zijn deze gegevens van belang.

Meet- en onderzoekstrategie

In Figuur 1 is de kringloop, die het opzetten van een grondonderzoeksplan behelst, gevisualiseerd. Er bestaan geen eenduidige recepten voor het opzetten van grondonderzoek en het vaststellen van de benodigde dichtheid van grondonderzoekspunten. Het opzetten van grondonderzoek en het schematiseren is een iteratief proces omgeven door onderkende onzekerheden over grondopbouw. Het reduceren van onzekerheden kan via gericht extra grondonderzoek. Of dit zinvol is, hangt mede af van het (verwachte) effect van deze onzekerheden in de mechanisme-analyses.



Figuur 1 Schema grondonderzoeksopzet.

De benodigde intensiteit van het grondonderzoek hangt van een aantal dingen af. De (van nature) aanwezige variatie in de ondergrond speelt een rol. Maar ook het benodigde detail voor beoordelen of ontwerpen. Dit hangt samen met enerzijds de omvang van het deel van de ondergrond dat bij een

faalmechanisme is betrokken en anderzijds van de afmetingen die behoren bij de eenheden. Daarnaast zijn er praktische grenzen aan de hoeveelheid grondonderzoek. Het mechanisme geotechnische stabiliteit betreft het afschuiven van de waterkering. De lengte van de afschuivende grondmoot blijkt bij praktijkgevallen in de orde van 50 tot 100 m te liggen.
Onderstaande tabel is deels overgenomen uit [Calle, 2012]. De in deze tabel genoemde aantallen kunnen beschouwd worden als richtinggevend voor de eerste opzet van een grondonderzoeksplan. Zonder de genoemde aantallen tot norm te verheffen zullen we die aanduiden als 'standaard opzet'. Vanwege de verschillen in voorbelasting en ontstaansgeschiedenis, wordt het grondonderzoek bij voorkeur in raaien uitgevoerd, met meerdere onderzoekpunten in een dwarsprofiel: één aan de buitenzijde, één in de kruin en één aan de binnenzijde. Als de ondergrond weinig variatie vertoont, kunnen de raaien worden afgewisseld met enkele sonderingen of boringen in de kruin. Op basis van beschikbare gegevens kan overwogen worden om (lokaal) meer of juist minder grondonderzoek uit te voeren.

Tabel 1 Voorbeeld van grondonderzoeksinspanning in verschillende projectfasen.

Projectfase ontwerp, toetsing	Gegevens	Informatiebron, grondonderzoek	Omvang	Ondergrondmodel en parameters
Definitie, Eenvoudige toetsing	Archief	Kaarten, Oude metingen	Gehele dijkstrekkingen	Voorlopige globale bodemopbouw (conservatief).
Definitie, Eenvoudige toetsing	Geologische kennis	Specialist	Gehele dijkstrekkingen	Voorlopige globale bodemopbouw (conservatief).
Definitie, Eenvoudige toetsing	Ervaring	Specialist	Gehele dijkstrekkingen	Voorlopige globale bodemopbouw (conservatief).
Definitie, Eenvoudige toetsing	Gebiedskennis	Specialist	Gehele dijkstrekkingen	Voorlopige globale bodemopbouw (conservatief).
Voorontwerp, Eenvoudige of	Vooronderzoek, veld	Geofysisch (EM)	2 à 4 raaien	Basis ondergrondmod

gedetailleerde toetsing				el en/of geohydrologisch model. Parameters uit classificatie
Voorontwerp, Eenvoudige of gedetailleerde toetsing	Vooronderzoek, veld	Sonderingen	Per 50 à 150 m	Basis ondergrondmodel en/of geohydrologisch model. Parameters uit classificatie
Voorontwerp, Eenvoudige of gedetailleerde toetsing	Vooronderzoek, veld	Boringen	Per circa 500 m	Basis ondergrondmodel en/of geohydrologisch model. Parameters uit classificatie
Voorontwerp, Eenvoudige of gedetailleerde toetsing	Vooronderzoek, veld	Peilbuizen	Per 50 à 100 m	Basis ondergrondmodel en/of geohydrologisch model. Parameters uit classificatie
Voorontwerp, Eenvoudige of gedetailleerde toetsing	Vooronderzoek, laboratorium	Classificatie	Minimaal 8 per boring	Basis ondergrondmodel en/of geohydrologisch model. Parameters uit classificatie
Detailontwerp, Gedetailleerde of geavanceerde toetsing	Detailonderzoek, veld	Boringen	Afhankelijk van de situatie	Aangepast ondergrondmodel en/of geohydrologisch model op specifieke locaties.

				Parameters uit veld- en laboratoriumtesten.
Detailontwerp, Gedetailleerde of geavanceerde toetsing	Detailonderzoek, veld	Diverse gegevens	Afhankelijk van de situatie	Aangepast ondergrondmodel en/of geohydrologisch model op specifieke locaties. Parameters uit veld- en laboratoriumtesten.
Detailontwerp, Gedetailleerde of geavanceerde toetsing	Detailonderzoek, veld	Geofysisch	Afhankelijk van de situatie	Aangepast ondergrondmodel en/of geohydrologisch model op specifieke locaties. Parameters uit veld- en laboratoriumtesten.
Detailontwerp, Gedetailleerde of geavanceerde toetsing	Detailonderzoek, laboratorium	Triaxiaaltesten	Circa 3 per boring, 4 per laag	Aangepast ondergrondmodel en/of geohydrologisch model op specifieke locaties. Parameters uit veld- en laboratoriumtesten.
Detailontwerp, Gedetailleerde of geavanceerde toetsing	Detailonderzoek, laboratorium	Samendrukkings testen	Circa 2 per boring, 3 per laag	Aangepast ondergrondmodel en/of geohydrologisch model op specifieke locaties. Parameters uit veld- en laboratoriumtesten.

Detailontwerp, Gedetailleerde of geavanceerde toetsing	Detailonderzoek, laboratorium	Zeefanalyses	3 à 5 per laag	Aangepast ondergrondmodel en/of geohydrologisch model op specifieke locaties. Parameters uit veld- en laboratoriumtesten.
Uitvoering, Beheer en onderhoud	Monitoring	Deformatiemetingen (zakbaak, InSAR)	Gehele dijkstrekking	Aanpassen op basis van gedrag tijdens uitvoering. Verfijnen model (continu toetsen). Cross-checks parameters en gedrag.
Uitvoering, Beheer en onderhoud	Monitoring	Gedragsmetingen (DigiSpectie)	Gehele dijkstrekking	Aanpassen op basis van gedrag tijdens uitvoering. Verfijnen model (continu toetsen). Cross-checks parameters en gedrag.
Uitvoering, Beheer en onderhoud	Monitoring	Waterspanningen	Gehele dijkstrekking	Aanpassen op basis van gedrag tijdens uitvoering. Verfijnen model (continu toetsen). Cross-checks parameters en gedrag.

Voor de grondopbouw kan geofysisch onderzoek gedaan worden om de (globale) ligging van en variaties in de deklaag af te leiden. Daarbij moeten boringen uitgevoerd worden om de individuele

lagen binnen de deklaag te onderscheiden, hiervoor kan ook laboratoriumonderzoek gebruikt worden. Tot slot kunnen sonderingen gebruikt worden om individuele laagscheidingen te onderscheiden.
Versie 1.0: 2 juli 2025

Geotechnische boringen en boormonstername voor de grondopbouw

Boringen lenen zich naast het classificeren, in tegenstelling tot sonderingen, uitermate goed voor het bemonsteren van grond ten behoeve van laboratoriumonderzoek. Boringen worden uitgevoerd conform NEN-EN-ISO 14688-1 en geclassificeerd conform NEN-EN-ISO 14688-2. De volgende boortechnieken worden in de Nederlandse praktijk toegepast:

- Handboring: afhankelijk van de grondsoort en of boven of onder het grondwater geboord wordt, zijn hier verschillende boorsystemen voor beschikbaar.
- Mechanische boring: er bestaan verschillende technieken van mechanisch boren. De meest toegepaste methode is de Ackermann boring (een pulsboring). Machinale boringen moeten tevens worden uitgevoerd conform BRL SIKB 2100, protocol 2101.

Voor een uitgebreide beschrijving van de boormethoden wordt verwezen naar het Technisch rapport waterkerende grondconstructies, [TAW, 2001].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Sonderingen (en de verschillende typen) voor de grondopbouw (incusief correlaties)

De meest gebruikte toepassing van de elektrische druksondering (of kortweg sondering) is de bepaling van de bodemopbouw (laagscheidingen en classificatie van grondlagen). De methode is (inter)nationaal gestandaardiseerd; uitvoering conform NEN-EN-ISO 22476-1 en classificatie conform NEN-EN-ISO 22476-2.

Bij een sondering wordt de weerstand gemeten, die een conusvormig element ondervindt bij het wegdrukken in grond, bij een gestandaardiseerde penetratiesnelheid. Op basis van de gemeten conusweerstand kan onderscheid gemaakt worden tussen draagkrachtige (zand)lagen en minder draagkrachtige (veen- of klei)lagen. Met behulp van een kleefmeting (ofwel meting van de plaatselijke wrijvingsweerstand) kan bovendien onderscheid gemaakt worden tussen klei- en veenlagen met eenzelfde conusweerstand. Afhankelijk van de sondeerklasse wordt de waterspanning en helling gemeten. Daarnaast is de nauwkeurigheid en meetintensiteit afhankelijk van de sondeerklasse. De verschillende sondeerklassen zijn toegelicht in onderstaande tabel.

Tabel 1 Overzicht sondeerklassen.

Toepassing klasse	**Test type**	**Gemeten parameter**	**Toegestane minimum nauwkeurigheid[a]**	**Maximum lengte tussen metingen**	**Grondsoort[b]**	Interpretatie /evaluatie[c]
1	TE2	Conusweerstand	35 kPa of 5%	20 mm	A	G,H

		Mantelwrijving	5 kPa of 10%			
		Waterspanning	10 kPa of 2%			
		Helling	2°			
		Sondeerlengte	0,1 m of 1%			
2	TE1 TE2	Conusweerstand	100 kPa of 5%	20 mm	A	G,H*
					B	G,H
		Mantelwrijving	15 kPa of 15%		C	G,H
		Waterspanning[d]	25 kPa of 3%		D	G,H
		Helling	2°			
		Sondeerlengte	0,1 m of 1%			
3	TE1 TE2	Conusweerstand	200 kPa of 5%	50 mm	A	G
					B	G,H*
		Mantelwrijving	25 kPa of 15%		C	G,H
		Waterspanning[d]	50 kPa of 5%		D	G,H
		Helling	5°			
		Sondeerlengte	0,2 m of 2%			
4	TE1	Conusweerstand	500 kPa of 5%	50 mm	A	G*
					B	G*
		Mantelwrijving	50 kPa of 20%		C	G*
		Sondeerlengte	0,2 m of 2%		D	G*

NOTE: Voor uiterst slappe gronden zijn soms nog hogere nauwkeurigheden noodzakelijk.

1. De toegestane minimum nauwkeurigheid van de gemeten parameters is de grootste van de twee genoemde. De relatieve nauwkeurigheid geldt voor de gemeten waarden en niet voor het

meetbereik.

2. Volgens ISO 14688-2:
   - A Homogene gronden bestaande uit zeer slappe tot stijve kleien en silt (q_c < 3 MPa).
   - B Gemengde bodemprofielen met slappe tot stijve kleien (q_c ≤ 3 MPa) en matig dicht zand (5 MPa ≤ q_c < 10 MPa).
   - C Gemengde bodemprofielen met stijve kleien (1,5 MPa ≤ q_c < 3 MPa) en zeer dicht zand (q_c > 20 MPa).
   - D Zeer stijve tot harde kleien (q_c ≥ 3 MPa) en zeer dicht grof grond (q_c ≥ 20 MPa).
3. Interpretatie:
   - G Vaststelling bodemprofiel en bepaling van grondsoort met een laag niveau van onzekerheid.
   - G* Indicatieve vaststelling bodemprofiel en bepaling van grondsoort met een hoog niveau van onzekerheid.
   - H Interpretatie met betrekking tot ontwerp met een laag niveau van onzekerheid.
   - H* Interpretatie met betrekking tot ontwerp met een hoog niveau van onzekerheid.
4. Waterspanning kan alleen worden gemeten als TE2 wordt toegepast.

Classificatie van sonderingen kan worden uitgevoerd met bijvoorbeeld een Robertson-interpretatie [Robertson, 2016]. Om de grondopbouw af te leiden kunnen sonderingen geïnterpreteerd worden en eventueel in een geotechnische lengteprofiel geplaatst worden. Hiermee kan in lengte- en dwarsrichting de grondopbouw inzichtelijk worden gemaakt. Om de betrouwbaarheid van classificaties te controleren wordt aanbevolen om een vergelijking te maken met de resultaten van boringen op een aantal representatieve sondeerlocaties.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Geofysische metingen (en de verschillende soorten) voor de grondopbouw

Geofysische metingen zijn op zichzelf niet toepasbaar als grondonderzoekstechnieken om laagopbouw mee af te leiden. De metingen geven wel aanvullend en gebiedsdekkend inzicht in (verschillen in) de laagopbouw ten opzichte van de puntmetingen (boringen/sonderingen). Het kan hierdoor bijdragen aan het maken van een gedegen grondonderzoeksopzet. Nieuwe gebiedsdekkende methoden hebben vooral betrekking op monitorings- en overige geo-informatie, zoals visuele inspectie (DigiSpectie), digitale hoogte (elevation) modellen (DEM's, LiDAR) en deformatiemetingen (InSAR).

Elk goed uitgevoerd onderzoek begint met een strategie. In het algemeen dienen geofysische technieken altijd uitgevoerd te worden in combinatie met in-situ-meettechnieken, waarmee de verkregen parameterwaarden en verschillen geijkt kunnen worden. De achtergronden van en Geofysische meettechnieken zijn beschreven in Geofysische methoden (voor geotechnische ingenieurs) [Zuada Coelho, 2015]. De meest toegepaste metingen zijn:

- Grondradar/Boorgatradar (elektromagnetisch), ten behoeve van bodemopbouw, detecteren anomalieën.
- Passieve Microgolfradiometrie (Miramap, mobile radiometer), ten behoeve van detectie holle ruimtes, dijkbekleding, vochtindringing, kwel en dergelijke.
- Elektromagnetische meting, FDEM (ondiep, TEM (diep), met name bedoeld voor het vaststellen van de bodemopbouw en de detectie van anomalieën.
- Geo-elektrische meting; met behulp van electroden kan de weerstand in de ondergrond worden gemeten, met name geschikt voor de grondopbouw en de detectie van anomalieën. Kan lastig zijn in een situatie met brak of zout grondwater.

- Seismische metingen; diverse meetmethoden zijn beschikbaar, waarbij gebruik gemaakt wordt van seismische golven (golven die zich door het aardoppervlakte voortplanten). De bekendste methoden zijn: sonarsystemen, zoals MultiBeam-sonar, SideScan-sonar, subbottom profiler (SBP), M3-sonar (Multi Mode Multibeam). De multibeam-methode wordt voornamelijk gebruikt voor het bepalen van de diepteligging van waterbodems en oppervlaktes, waarbij ook bodemprofielen (zoals sliblaagdiktes) bepaald kunnen worden. Met M3-sonar wordt een 2-dimensionaal onderwaterprofiel verkregen.
- Akoestische emissie; hiermee wordt gebruik gemaakt van geluidsgolven in de bodem. Bij onregelmatigheden in de bodem (veranderingen in bodemsaneringstelling) zal de golf ombuigen of terugkaatsen en zich splitsen in meerdere zwakkere golven met verschillende richtingen. Daarnaast hebben golven in de verschillende lagen een andere snelheid. Op enkele tientallen meters of meer van de geluidsbron worden al deze golven opgevangen met geofoons; speciale microfoons die in de bodem worden geprikt. Deze geluiden worden geïnterpreteerd op de structuur en eventuele aanwezigheid van onregelmatigheden in de bodem. Het resultaat is een dwarsdoorsnede van de bodem waarop deze onregelmatigheden zijn te onderscheiden. Meerdere dwarsdoorsneden zijn te combineren tot een 3D-beeld van de bodem.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Laboratoriumonderzoek (met name de classificatie-onderzoeken) voor de grondopbouw

Met behulp van laboratoriumonderzoek kunnen geotechnische laageigenschappen bepaald worden. Laboratoriumclassificatie, volumiek gewicht en watergehalte, of proctordichtheid proeven worden veelvuldig uitgevoerd voor het beter inzichtelijk maken van de grondopbouw bij het toetsen of ontwerpen van waterkeringen.

De grondsoorten kunnen met meer zekerheid (dan alleen met een veldclassificatie) worden bepaald met behulp van laboratoriumonderzoek op monsters van boringen. Met behulp van laboratoriumonderzoek kunnen geotechnische laageigenschappen bepaald worden. De volgende beproevingen worden veelvuldig uitgevoerd voor het beter inzichtelijk maken van de grondopbouw bij het toetsen of ontwerpen van waterkeringen. Hieronder is een beknopte beschrijving opgenomen van het toepassingsgebied met voor- en nadelen. Voor een uitgebreide beschrijving van de proeven wordt verwezen naar [Technisch rapport waterkerende grondconstructies, 2001] of betreffende NEN-normbladen.

- Laboratoriumclassificatie. Ten behoeve van de identificatie van grondlagen, vaak ter verificatie van de (ruwe) veldclassificatie. Hiermee kunnen Atterbergse grenzen (vloeigrens, uitrolgrens en plasticiteitsindex), zandgehalte, lutumgehalte, kalkgehalte, organische stof gehalte, zoutgehalte en korrelverdeling worden onderzocht. Het voordeel hiervan is dat de classificatie objectiever kan worden bepaald dan bij een veldclassificatie.
- Volumiek gewicht en watergehalte. Relatief eenvoudige en goedkope proef die kan worden uitgevoerd op een klein ongeroerd monster.
- Proctordichtheid. Uit de proctorproef volgt het optimum watergehalte W_{opt}. Dit is het watergehalte waarbij de grootste dichtheid verkregen kan worden. Deze proeven geven een goede indicatie over de verwerkbaarheid van klei en worden daarom veel gebruikt tijdens de uitvoering.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Gebruik van registratie-objecten uit de Basisregistratie Ondergrond (BRO) voor de

grondopbouw

De Basisregistratie Ondergrond (BRO) is een centrale registratie met publieke gegevens over de Nederlandse ondergrond. Overheden leggen voor dezelfde objecten dezelfde, betrouwbare, algemene gegevens vast. Vanuit één centrale digitale plek, de landelijke voorziening, kunnen gebruikers gegevens opvragen voor informatie over bodem en ondergrond. Op de datasets kunnen ook rekenprogramma's en modellen uitgevoerd worden. Deze gegevens kunnen gebruikt worden om inzicht te krijgen in de grondopbouw.

Het betreft met name ondergrondgegevens (registratieobjecten) zoals: grondwatermonitoringsputten, geotechnisch sondeeronderzoek, bodemkundige, geotechnische en geologische boormonsterbeschrijving en boormonsteranalyse, maar ook modellen zoals: bodem- en geomorfologische kaart, REGIS II (geohydrologisch model), GeoTop en DGM (Digitaal Geologisch Model). De registratieobjecten zullen op termijn verder aangevuld en uitgebreid worden.

Gegevens van de Basisregistratie Ondergrond zijn ook via het DINOloket beschikbaar. De hierboven genoemde gegevens kunnen gebruikt worden voor het schematiseren van grondlagen en/of het afleiden van grondparameters.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Gebruik van geologische informatie, zoals kaarten

Geologische informatie zoals kaarten kunnen gebruikt worden om inzicht te krijgen in de opbouw van de ondergrond. Een voorbeeld hiervan is de zandbanenkaart die gebruikt kan worden om de ligging van zandlagen te vinden. In het algemeen is geologische informatie tot ongeveer 50 meter diep belangrijk voor dijken. In Nederland betreft dit de diepte van de Pleistocene en Holocene lagen, die relevant zijn tot en met het eerste watervoerende pakket.

Vindplaatsen van geologische kaarten zijn onder andere:

- Geologie van Nederland. Een website met informatie over de Nederlandse bodem.
- DINOloket en Basisregistratie Ondergrond (BRO). De Basisregistratie Ondergrond is nog in ontwikkeling en bouwt voort op een aantal bestaande registraties, waaronder de DINO-database van TNO (Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond). Een deel van de gegevens uit DINO gaat over naar het BRO-systeem. Hier kunnen onder andere boringen en sonderingen in de ondergrond worden ingezien.
- Zandbanen- en zanddieptekaart provincie Gelderland. Geeft de diepte van de bovenste zandlaag.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Geohydrologische aspecten bij het schematiseren van de grondopbouw

Geohydrologische schematisering

Op basis van de geïdentificeerde geohydrologische situatie moet de geohydrologische schematisering worden opgesteld. Veelal gaat het om waterspanningen in zandlagen onder de dijk die bij de binnenteen voor opdrijven of opbarsten zouden kunnen zorgen. Ook gaat het om het verloop van waterspanningen (verticaal) over klei- en veenpakketten en/of stijghoogtes in het dijklichaam, voor zover die via grondwaterstroming door de ondergrond ontstaan.

De geohydrologische karakterisering is een schematisering van lagen die watervoerend zijn (zandlagen) en slecht doorlatende pakketten (klei en veenlagen). Van de watervoerende lagen moet aangegeven worden of en hoe die in verbinding (kunnen) staan met oppervlaktewater, wat invloed

kan hebben, of heeft, op het waterspanningsbeeld in de dijk en de omgeving. Daarbij moet uiteraard rekening worden gehouden met de 3D configuratie van de lagen. In de slecht doorlatende lagen worden in de regel slechts geringe horizontale grondwaterstroming verondersteld. Als gevolg van potentiaalverschillen tussen watervoerende lagen boven en onder de slecht doorlatende laag kan ook verticale grondwaterstroming optreden.

Doel van de geohydrologische schematisering

Doel van de geohydrologische schematisering is primair het in beeld brengen van de mogelijke invloed van (veranderingen van) open waterpeilen en grondwaterpeilen in de omgeving op de ontwikkeling van waterspanningen in en nabij de dijk. Op basis van de geohydrologische schematisering kunnen rekenmodellen voor grondwaterstroming worden gekozen om de waterspanningen in de ontwerp- of toetssituatie te berekenen en/of aan de hand van metingen te schatten (bijvoorbeeld extrapolatie van een meting van de getijderespons).
Ook kunnen gebiedsdekkende grondwatermodellen opgesteld en/of gebruikt worden, welke gekalibreerd dienen te worden op basis van meetdata.

Mate van detail

De benodigde mate van detail van de schematisering is afhankelijk van de rekenmodellen die men wil toepassen. Detailinformatie wordt ontleend aan:

- Boringen en sonderingen (voor het classificeren en schatten van de dikte van grondlagen).
- Peilbuismetingen en zo mogelijk responsmetingen in de zandlagen, om te verifiëren of en in welke mate deze communiceren met oppervlaktewater.
- Waterspanningsmetingen in slecht doorlatende lagen.
- Metingen van grondwaterstanden (freatisch).

Lengterichting

Net als voor de globale karakterisering van de ondergrondopbouw geldt dat de geohydrologische karakterisering in de lengterichting en dwars op de dijk variabel kan zijn. Verder geldt ook dat de beschikbare informatie niet toereikend kan zijn om tot een eenduidig geohydrologische karakterisering of modelering te komen. Met additioneel grondonderzoek (bijvoorbeeld metingen van waterspanningen) kan dan geprobeerd worden wel een eenduidig(er) beeld te verkrijgen. Maar ook dan kunnen er nog onzekerheden resteren. Deze moeten worden meegenomen in het verdere schematiseringproces.

Versie 1.0: 2 juli 2025

3. Grondlaageigenschappen

Definitie (grond)laageigenschappen (geotechnisch en geohydrologisch)

Geotechnische (grond)laageigenschappen

Onder (grond)laageigenschappen wordt verstaan: de geotechnische ofwel geohydrologische karakteristieken van een (grond)laag.

Onder geotechnische laageigenschappen vallen karakteristieken die lokaal de toestand van de grondlaag kenmerken. Hieronder vallen laageigenschappen als:

- Grensspanning, POP (Pre-Overburding Pressure) en de OCR (Over-Consolidation Ratio), welke een maat zijn voor de belastinggeschiedenis. Deze zijn van belang voor de geotechnische stabiliteit en de vervormingen, omdat deze invloed hebben op de sterkte en stijfheid van de

grond.
- De pakkingsdichtheid van de zandlaag. Dit is van belang voor onder andere het bepalen van de verwekingsgevoeligheid van het zand (dus mogelijk optreden van zettingsvloeiing). De pakkingsdichtheid kan worden uitgedrukt in een state parameter als of de relatieve dichtheid.

Geohydrologisch (grond)laageigenschappen

Onder geohydrologische laageigenschappen vallen karakteristieken die de watervoerende eigenschappen van de grondlaag kenmerken. Hieronder vallen laageigenschappen als:

- Doorlatendheid van de watervoerende (zand)laag (in m/s of m/d): de doorlatendheid van de grond(laag) is het vermogen van de grond(laag) om vloeistof door te laten. De doorlatendheid kan richtingsafhankelijk zijn. In vereenvoudigde modellen wordt gebruik gemaakt van de horizontale doorlatendheid van de laag.
- Weerstand (in dagen) of doorlatendheid (in m/s of m/d) van de cohesieve deklaag: de deklaag wordt gedefinieerd als de relatief slecht doorlatende laag (klei en veen) die bovenop het 1^{e} watervoerende pakket aanwezig is. Deze laag geeft een weerstand op grondwaterstroming die kan worden uitgedrukt in dagen (afhankelijk van de dikte: weerstand = laagdikte / doorlatendheid). In de vereenvoudigde modellen wordt gebruik gemaakt van de verticale doorlatendheid voor deze laag.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Meet- en onderzoekstrategie voor de laageigenschappen (inclusief dichtheid)

In aanvulling op het artikel Meet- en onderzoekstrategie voor de grondopbouw kan aanvullend onderzoek worden uitgezet om de in Definitie (grond)laageigenschappen genoemde geotechnische en geohydrologische eigenschappen in kaart te brengen.

Onderzoeken

Hiervoor kunnen specifieke onderzoeken worden ingezet:

1. (Specifieke) sonderingen:

- Om een grensspanningsprofiel te bepalen (eventueel met waterspanningsmeting).
- HPT (hydraulic profiling tool) / (A)MPT (anisotrope minipomptest) sonderingen om de (relatieve) doorlatendheid in beeld te brengen.
- Om de state parameter (Ψ- een maat voor de pakking van een zandlaag) af te leiden (eventueel met waterspanningsmeting).

2. Monstername en beproeving:

- Van de korrelverdeling om een inschatting van de doorlatendheid te bepalen (NB: waar bij piping vooral eigenschappen van de bovenkant van de zandlaag worden ingewonnen, is het voor de laageigenschappen vooral van belang om een representatief beeld over de grondlaag te verzamelen).
- Uitvoeren constant rate of strain (CRS) proef of een samendrukkingsproef ten behoeve van het bepalen van de grensspanning.

3. Geohydrologische metingen om de doorlatendheid (direct of indirect) of weerstand van de deklaag te meten:

- Peilbuismetingen/grondwater(spannings)metingen.

- Pomp- en putproeven.
- Infiltratieproeven.

Welk onderzoek het beste kan worden ingezet is in grote mate afhankelijk van de informatiebehoefte (vanuit de specifieke mechanismen) en beschikbaarheid. Indien er geohydrologische modellen zijn of worden opgesteld, zijn bijvoorbeeld peilbuismetingen nodig voor de kalibratie van het model.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Geotechnische boringen en boormonstername voor de laageigenschappen

Boringen en infiltratieproeven kunnen gebruikt worden ter bepaling van laageigenschappen.

Boringen

Boringen lenen zich uitermate goed voor het bemonsteren van grond ten behoeve van laboratoriummetingen. Daarnaast kan het geboorde gat eenvoudig worden gebruikt om peilbuizen in te plaatsen ten behoeve van metingen van de stijghoogten in verschillende grondlagen (tot aan de maximaal geboorde diepte). De volgende boortechnieken worden in de Nederlandse praktijk toegepast:

- Handboring: afhankelijk van de grondsoort en grondwaterspiegel, zijn hier verschillende boorsystemen voor beschikbaar. Het handboren is relatief zware arbeid, veel bureaus laten hun veldmedewerkers daarom tot maximaal 5 m beneden maaiveld boren. Ook het steken van grote (Ackermann)bussen ten behoeve van het uitvoeren van triaxiaal- en samendrukkingsproeven wordt gezien als belastend voor de veldwerker.
- Mechanische boring: er bestaan verschillende technieken van mechanisch boren. De meest toegepaste methode is de Ackermann boring (een pulsboring). Deze methode is geschikt voor monstername ten behoeve van laboratoriumanalyses voor het bepalen van geotechnische eigenschappen.

Infiltratieproeven

Zie hiervoor het artikel Pomp put infiltratieproeven.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Sonderingen (en de verschillende typen) voor de laageigenschappen (inclusief correlaties)

Speciale sonderingen

Naast de standaard toegepaste elektrische kleefmantelconus die traditioneel veel worden gebruikt voor het bepalen van de grondopbouw (zie Sonderingen (en de verschillende typen) voor de grondopbouw), zijn meer conussoorten en -vormen te onderscheiden die aanvullende informatie geven over de eigenschappen van de lagen, zoals:

- Waterspanningssonderingen. Met een piëzo-conus wordt de conusweerstand (q_c), de plaatselijke mantelwrijving (f_s) en de waterspanning (u) gemeten. Deze methode geeft tegen relatief lage kosten een beeld van de dynamische waterspanning (immers door de druksnelheid geïnitieerde waterspanning). De waterspanningsmetingen kunnen worden gebruikt om de stijghoogte uit af te leiden (indicatief). Deze methode geeft het resultaat op één specifiek tijdstip en is niet geschikt voor het meten van de respons van de stijghoogte op een hoogwatergolf. Dissipatietesten (onderbreken van sondeerproces en meten afname van de waterspanning in de tijd) worden gebruikt om een indicatie te geven van de (verticale)

doorlatendheid van de cohesieve lagen.

- Elektrische dichtheidsmeting voor het bepalen van het poriëngehalte van met water verzadigd zand met als toepassingsgebied het faalmechanisme zettingsvloeiing (ontwikkeld door GeoDelft). Gespecialiseerd en kostbaar onderzoek (veelal vanaf het water uit te voeren) wordt niet op grote schaal toegepast in de huidige toets- en ontwerppraktijk.
  De Hydraulic-Profiling-Tool (HPT) conus, hiermee kan inzicht worden verkregen in de relatieve doorlatendheid van de bodem. Daarbij wordt tijdens het sonderen met een constant debiet water in de bodem geïnjecteerd door een opening in de HPT. Een druksensor meet hierbij de drukrespons van de bodem. Aan de hand van de geregisterde druk kan de relatieve doorlatendheid worden bepaald. Daarbij is het tevens mogelijk om op verschillende dieptes 'pneumatic slug testen' uit te voeren om in-situ de doorlatendheid van de bodem op de betreffende dieptes te bepalen. Samen met het relatieve doorlatendheidsprofiel, dat over de hoogte verkregen wordt, is hiermee een continu beeld van de doorlatendheid van de ondergrond vast te stellen. Met name voor geohydrologische modellen, maar ook voor bijvoorbeeld piping en/of zettingsvloeiing is de doorlatendheid een belangrijke parameter.
- De (A)MPT-minipompproef (Mini-Pumping Test) wordt in de praktijk vaak gelijktijdig met een HPT-sondering uitgevoerd. Op verschillende diepten wordt tijdens een HPT-sondering een korte test (mini-pompproef) uitgevoerd, waarbij water in de bodem wordt gepompt en de drukopbouw op enige afstand wordt gemeten. In het geval van de MPT is dat in de verticaal, onderaan de sondeerconus. Er gaat bij de HPT-MPT combinatie dus maar 1 stang naar beneden met alle sensoren en injectie-elementen erin/-aan. Uit de MPT-meting kan de absolute doorlatendheid K [m/s of m/etmaal] en de bergingscoëfficiënt S_s [-] worden berekend. Dit wordt gebruikt om de relatieve doorlatendheid uit de HPT-sondering te vertalen naar een constant profiel van de doorlatendheid met de diepte.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Laboratoriumonderzoek voor de laageigenschappen

De doorlatendheid van een grondlaag kan worden bepaald door middel van laboratoriumonderzoek: korrelverdeling bepaling van zandmonsters en doorlatendheidsproeven in het laboratorium.

Laboratoriumonderzoek

De doorlatendheid van een grondlaag kan worden bepaald door middel van laboratoriumonderzoek:

- Korrelverdeling bepaling van zandmonsters: uit korrelverdelingen kunnen (naast parameters voor piping) parameters worden afgeleid ten behoeve van geohydrologische modellering (doorlatendheden). De kosten van korrelverdeling bepalingen zijn relatief beperkt en de methode is toepasbaar op geroerde monsters. Wel dient zorg te worden gedragen dat een representatief monster verkregen wordt. Met bepaalde boormethoden wordt uitsluitend de grove fractie verkregen. Hoe de doorlatendheid op basis van korrelverdelingsanalyses kan worden geschat staat beschreven in het 'Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen' [Förster, 2012].
- Doorlatendheidsproeven in het laboratorium. De 'constant head'-proef wordt toegepast voor goed doorlatende, weinig samendrukbare grond zoals zand. De 'falling head'-proef wordt toegepast bij slecht doorlatende, samendrukbare grond zoals veen en klei.

Voornamelijk in de resultaten van de laatste proef kunnen grote onzekerheden een rol spelen. De werkelijke doorlatendheid van veen en klei zal dikwijls worden bepaald door aanwezigheid van scheuren of andere bodemstructuren. Voor deze proeven is ongeroerde monstername noodzakelijk.

De POP, grensspanning of OCR in een laag kan worden ingeschat door middel van laboratoriumonderzoek op (ongeroerde) monsters binnen de grondlaag. Hiervoor kunnen CRS (constant rate of strain) proeven of samendrukkingsproeven worden ingezet.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Schematiseren grondlaageigenschappen

Bij het schematiseren van grondlaageigenschappen wordt onderscheid gemaakt in geohydrologische en geotechnische grondlaageigenschappen. Dit onderscheid wordt in dit artikel ook gevolgd.

Schematiseren van geohydrologische grondlaageigenschappen

Bij het schematiseren van geohydrologische grondlaageigenschappen worden grondlagen onderscheiden op basis van:

- (Horizontale) doorlatendheid van de watervoerende zandlaag. Vaak wordt de watervoerendheid van een zandlaag uitgedrukt door middel van de horizontale doorlatendheid. Echter, in sommige gevallen speelt anisotropie een rol, bijvoorbeeld bij wadafzettingen. In deze gevallen is de horizontale doorlatendheid niet gelijk aan de verticale doorlatendheid.
- Dikte van de watervoerende zandlaag. De geohydrologische eigenschappen van een grondlaag worden veelal uitgedrukt in een kD-waarde, waarin de dikte van de laag is meegenomen.
- Verticale doorlatendheid van de cohesieve (slecht doorlatende) deklaag. Opgemerkt wordt dat er met name bij veen vaak een groot verschil is tussen de horizontale en verticale doorlatendheid.
- Geologische en geomorfologische geschiedenis.

Om de doorlatendheid van een grondlaag af te leiden kunnen proeven en laboratoriumonderzoek uitgevoerd worden, zoals pompproeven, korrelverdelingen en doorlatendheidsproeven. De doorlatendheid van een grondlaag kan ook worden afgeleid, door middel van een geohydrologische modellering in combinatie met waterspannings- of peilbuismetingen. Een combinatie van deze methoden levert input voor een zo goed als mogelijke inschatting van de doorlatendheid.

Bij het schematiseren van grondlaageigenschappen op basis van laboratoriumproeven, dient de ruimtelijke variatie in de ondergrond in rekening te worden gebracht. Dit hang af van het faalmechanisme dat wordt beschouwd:

1. Bij geotechnische stabiliteit kan worden uitgegaan van een verwachtingswaarde van de doorlatendheid.
2. Bij het mechanisme piping dient een karakteristieke waarde aangehouden te worden. De karakteristieke waarde voor de doorlatendheid dient te worden afgeleid voor een 95%-waarde van een lognormale verdeling. Voor de doorlatendheid zal veelal een hoge (95%-waarde) karakteristieke waarde moeten worden aangehouden (hogere stijghoogte/stroomsnelheden). Hierbij kan rekening gehouden worden met het aantal proeven en de verhouding tussen de lokale en regionale variantie.

Schematiseren van geotechnische grondlaageigenschappen

Bij het schematiseren van geotechnische grondlaageigenschappen worden grondlagen onderscheiden op basis van:

- Grondsoort en samenstelling.
- Belastinggeschiedenis (grensspanning, POP of OCR).

- Relatieve dichtheid.
- Volumegewicht (gebruikelijk bij kleilagen).

Bij het schematiseren van grondlaageigenschappen dient rekening te worden gehouden met ruimtelijke variatie in de ondergrond. Voor de afleiding van de grondlaageigenschappen wordt verwezen naar de artikelen Meet- en onderzoekstrategie voor grondeigenschappen, Geotechnische boringen en boormonstername voor grondeigenschappen, Erosiemetingen voor grondeigenschappen en Laboratoriumonderzoek voor grondeigenschappen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

4. Grondeigenschappen

Definitie grondeigenschappen

De meest voorkomende grondsoorten in Nederland zijn: zand, klei en veen, met een groot scala van onderlinge mengverhoudingen. Grond bestaat uit drie componenten: vaste deeltjes (korrels), water en lucht. Het water en de lucht vullen de poriën tussen de korrels. Naast de eigenschappen van de vaste deeltjes heeft de verhouding waarin deze componenten voorkomen, invloed op het gedrag van de grond. De grondeigenschappen beschrijven de fysische eigenschappen van de grond. Deze kunnen tussen vrij ruime grenzen variëren. De belangrijkste eigenschappen zijn:

- Volumieke gewichten:
  - Verzadigd
  - Onverzadigd
- Classificatieparameters:
  - Korrelverdeling
  - Plasticiteit
- Vervormingsparameters:
  - Samendrukbaarheid/stijfheid
  - Dilatantie
  - Consolidatie
- Sterkteparameters:
  - Gedraineerde schuifsterkte
  - Ongedraineerde schuifsterkte
  - Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio
  - Sterktetoename-exponent
  - Cohesie
  - Hoek van inwendige wrijving
- Geohydrologische parameters:
  - Doorlatendheid
  - Berging
  - Erosiegevoeligheid

Per faalmechanisme zijn bepaalde eigenschappen belangrijk.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Van grondgedrag naar grondeigenschappen

Het gedrag van grond wordt bepaald door de sterkte- en stijfheidseigenschappen van de grondsoort.

Het gedrag van grondsoorten die slecht doorlatend zijn wordt over het algemeen beschreven als ongedraineerd gedrag. Voor goed doorlatende grondsoorten wordt het gedrag beschreven als gedraineerd. Meer informatie is beschreven in Keuze gedraineerd of ongedraineerd grondgedrag. Daarnaast is de in situ toestand van de grond belangrijk voor het gedrag van een grondsoort. Het gedrag is afhankelijk van de doorlatendheid van (aangrenzende) grondlagen en het vervormingsgedrag. De achtergrond hiervan wordt behandeld in Grondgedrag en rol van in situ toestand.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Omgang met ruimtelijke variatie, anisotropie en onzekerheden bij grondeigenschappen

Het bepalen van grondeigenschappen wordt vaak gedaan met behulp van laboratoriumproeven, maar het is ook mogelijk om een default set voor de parameters te hanteren. Bij laboratoriumproeven kan gebruik gemaakt worden van een lokale of regionale proevenverzameling (zie Karakteristieke waarde op basis van een regionale proevenverzameling en Karakteristieke waarde op basis van een lokale proevenverzameling). In het eerste artikel wordt ingegaan op de omgang met ruimtelijke variabiliteit in grondeigenschappen.

Een grondsoort wordt anisotroop genoemd als de eigenschappen van de grond niet in iedere richting hetzelfde zijn. Voor het faalmechanisme piping speelt dit vooral een rol in de doorlatendheidsparameters. Bij heterogene zandlagen verschilt de doorlatendheid in de verticale en horizontale richting. De anisotropie in doorlatendheid kan worden gemeten met HPT-AMPT-metingen.

Bij het mechanisme afschuiven speelt dit een rol in de sterkte van de grond. Bij het beschrijven van grondgedrag wordt vaak verondersteld dat de sterkte van de grond in de actieve, passieve en neutrale zone even groot is, maar dit is niet helemaal juist. Grond heeft namelijk een andere sterkte in compressie dan in extensie. Daarnaast kan de schuifsterkte ook variëren met de richting van het schuifvlak. Dit gedrag wordt anisotropie genoemd. Een internationaal bekende methode om anisotropie in rekening te brengen is de ADP-methode (Active, Direct, Passive). In bijlage 2 van het [Technisch rapport waterkerende grondconstructies, 2001] wordt deze methode uitgebreid beschreven. Daarnaast wordt in artikel Piek-schuifsterkte versus grote-rek-schuifsterkte verder ingegaan op anisotropie en de invloed hiervan op de ongedraineerde schuifsterkte.

De omgang met onzekerheden in grondeigenschappen staat beschreven in Materiaalfactor voor macrostabiliteit.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Karakteristieke waarde, rekenwaarde of stochasten voor grondeigenschappen

In de paragraaf ‘Achtergronden’ van Karakteristieke schattingen van de schuifsterkte van grond is de achtergrond gegeven over het bepalen van karakteristieke waarden, rekenwaardes of stochasten. Voor het bepalen van karakteristieke waarden voor grondeigenschappen kan ook gebruik gemaakt worden van tabel 2b van de NEN-EN 1997-1 [NEN, 2019]. Bedacht moet worden dat de betreffende waarden (in de meeste gevallen conservatieve) karakteristieke waarden betreffen.

Materiaalfactor voor grondeigenschappen

In Materiaalfactor voor macrostabiliteit staat beschreven hoe de materiaalfactor wordt bepaald en toegepast.

Schematiseringsfactor voor grondeigenschappen

In Schematiseringsfactor voor macrostabiliteit staat beschreven hoe de schematiseringsfactor wordt bepaald en toegepast.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Classificatieparameters

Bij het classificeren van grond wordt gebruik gemaakt van bepaalde parameters. De keuze voor de classificatieparameter is afhankelijk van het soort grond en de nauwkeurigheid van de meting. Metingen van een eerste terreinverkenning door handboringen zijn in principe voldoende geschikt voor het classificeren van grondeigenschappen.

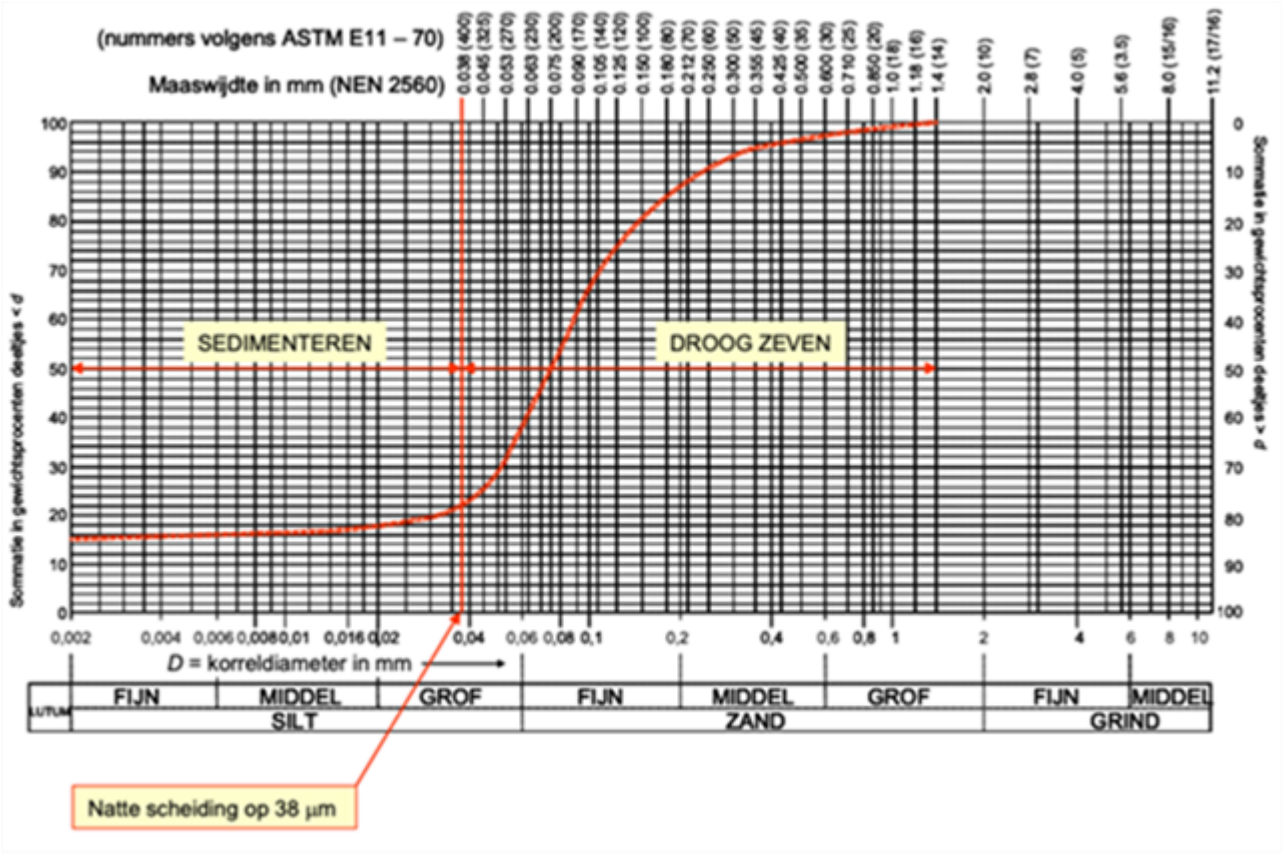
Enkele voorbeelden van classificatieparameters zijn:

- Korrelverdeling.
- Plasticiteit.
- Samenstelling.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Korrelverdeling

De korrelverdeling helpt belangrijke grondsoorten te identificeren en hun eigenschappen te bepalen. De korrelverdeling beschrijft de percentages van korrelfracties die groter of kleiner zijn dan een bepaalde diameter en wordt voor zand en grind vaak in een grafiek (korrelverdelingsdiagram) gepresenteerd, zie Figuur 1.



Figuur 1 Voorbeeld van een korrelverdelingsdiagram [Backhausen, 2014].

Om deze percentages, per korrelgroottebereik, te vinden worden verschillende technieken toegepast die horen bij verschillende categorieën / grondsoorten, zie onderstaande tabel. De eerste techniek wordt gebruikt voor de korrelgroottebereik die onder de categorieën 'Zeer grove grond' en 'Grove grond' vallen. Dit betreft droge zeving, waarvoor zeven gebruikt worden conform NEN-EN 933-1 (voormalige NEN 2560) [NEN, 2021]. Voor deeltjes kleiner dan circa 0,063 mm is dit echter niet geschikt. In dat geval kan, tot circa 0,016 mm, overgegaan worden op natte zeving. Voor de bepaling van deze (< 0,063 mm), of nog fijnere fracties zijn andere methoden beschikbaar op basis van bezinking (pipet-methode, areometer) of röngenstraling (sedigraaf). De bezinkingsmethoden zijn gebaseerd op de Wet van Stokes [Van Deen, 2000].

Tabel 1 Korrelgroottefracties conform NEN-EN 14688+1+2. [NEN, 2020]

Categorie	**Korrelgroottefracties (afkorting)**	Korrelgroottebereik (mm)
Zeer grove grond	Blokken (Lbo)	> 630
Zeer grove grond	Keien (Bo)	> 200 tot ≤ 630
Zeer grove grond	Keitjes (Co)	> 63 tot ≤ 200
Grove grond	Grind (Gr)	> 2,0 tot ≤ 63
Grove grond	• Grof grind (cGr)	> 20 tot ≤ 63
Grove grond	• Middelgrof grind (mGr)	> 6,3 tot ≤ 20
Grove grond	• Fijn grind (fGr)	> 2,0 tot ≤ 6,3
Grove grond	Zand (Sa)	> 0,063 tot ≤ 2,0
Grove grond	• Grofkorrelig zand (cSa)	> 0,63 tot ≤ 2,0
Grove grond	• Middelgrofkorrelig zand (mSa)	> 0,2 tot ≤ 0,63

Grove grond	• Fijnkorrelig zand (fSa)	> 0,063 tot ≤ 0,2
Fijne grond	Silt (Si)	> 0,002 tot ≤ 0,0063
Fijne grond	• Grof silt (cSi)	> 0,02 tot ≤ 0,063
Fijne grond	• Middelgrof silt (fSi)	> 0,0063 tot ≤ 0,02
Fijne grond	• Fijn silt (fSi)	> 0,002 tot ≤ 0,0063
Fijne grond	Klei (Cl)	≤ 0,002

Versie 1.0: 2 juli 2025

Plasticiteit

Plasticiteit houdt in dat na het wegnemen van een belasting er nog een restvervorming over blijft. Bij oplopend watergehalte kunnen, met name voor cohesieve materialen, de volgende fases worden onderscheiden:

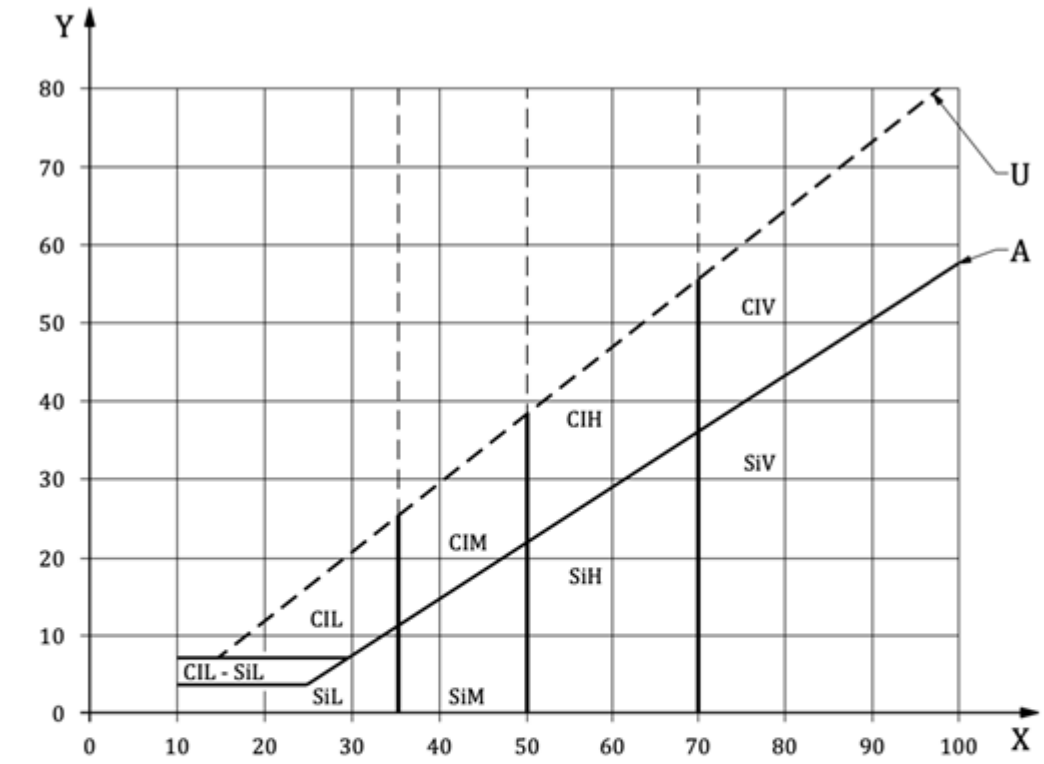
- Vaste fase.
- Plastische fase.
- Vloeibare fase.

De uitrolgrens is het watergehalte die de overgang van de vaste fase naar de plastische fase weergeeft. De vloeigrens is het watergehalte die de overgang van de plastische fase naar de vloeibare fase weergeeft.

Plasticiteit is een parameter voor grondclassificatie, zie Classificatieparameters.

Plasticiteitsindex

De mate van plasticiteit kan worden geclassificeerd door middel van de plasticiteitsindex. De plasticiteitindex is het verschil tussen de vloeigrens en de uitrolgrens, zie Erosiegevoeligheid/-bestendigheid. In onderstaande figuur is een voorbeeld van de plasticiteitsindex te zien.



Legenda

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

Figuur 1 Voorbeeld plasticiteitsindex.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S

De normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio (S) is een wrijvingsparameter voor het karakteriseren van de ongedraineerde schuifsterkte van grond onder normaal geconsolideerde condities.

De normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio (S) is de ongedraineerde schuifsterkte s_u gedeeld door de consolidatiespanning σ'_{vc} bij een overconsolidatieratio $OCR = 1$. De grootheid is een verhouding tussen spanningen en dus dimensieloos. In de ongedraineerde schuifsterkte ratio is naast het effect van de wrijving tussen de gronddeeltjes ook het effect van de generatie van waterspanning bij ongedraineerd grondgedrag verdisconteerd. In onderstaande tabel is aangegeven welke SOS-eenheden worden geanalyseerd op basis van de ongedraineerde schuifsterkte ratio.

S wordt in het laboratorium bepaald met eentraps anisotroop geconsolideerde triaxiaalproeven voor klei en met direct simple shear proeven voor veen. De direct simple shear proef geeft betrouwbare

schuifsterkte parameters voor veen, doordat de bezwijkvorm in deze proef goed aansluit bij de structuur van veen. De proeven worden uitgevoerd met constante hoogte, omdat dit wordt gezien als een ongedraineerde proef. Meer details zijn te vinden in het Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen [Greeuw, 2016].
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 (ultimate state; voor klei en zand 25% axiale rek bij triaxiaalproeven en voor veen 40% schuifrek bij direct simple shear proeven). Voor een gebruikelijke stabiliteitsanalyse wordt uitgegaan van grote-rek-waarde. Als een scherpere analyse noodzakelijk is, kan worden overwogen of de S bij de piekwaarde van de schuifsterkte kan worden toegepast (zie artikel Piek-schuifsterkte versus grote-rek-schuifsterkte).

De parameter S wordt voor een probabilistische berekening (Riskeer) beschreven als stochast met een lognormale verdeling die wordt gekarakteriseerd met een verwachtingswaarde en standaardafwijking.

Klei met veel silt en zand (ook löss en keileem) met volumegewichten γ_{nat} van 17 à 18 kN/m^3 en hoger is een aandachtspunt. Dit materiaal kan sterke dilatantie vertonen bij ongedraineerd afschuiven in triaxiaalproeven; ook bij normaal geconsolideerde condities. Deze dilatantie is niet gerelateerd aan de overconsolidatiegraad OCR. De overconsolidatiegraad OCR is daarbij vaak niet eenduidig vast te stellen, als gevolg van een doorgaand gekromd verloop in samendrukkingsproeven. Het SHANSEP-model kan daarom vanuit de theorie niet worden gebruikt om de schuifsterkte van dit type kleien te schematiseren. Achtergronden hierbij zijn gegeven in het artikel Ongedraineerde schuifsterkte van zware zandige siltige klei. Voor alle slecht doorlatende klei wordt het SHANSEP-model toegepast. Het is daarbij essentieel dat de combinatie van de gekozen SHANSEP-parameters S, m en OCR past bij de karakteristieke ondergrenswaarde van de ongedraineerde schuifsterkte s_u, die is afgeleid uit laboratoriumonderzoek. Wanneer een stabiliteitsanalyse van een dijkvak waarin de genoemde kleisoorten voorkomen een te hoge faalkans oplevert bij toepassing van het SHANSEP-model, kan nader onderzoek worden ingesteld en de schuifsterkte worden geschematiseerd met profielen van de ongedraineerde schuifsterkte (bijvoorbeeld methode su-table in D-Stability).

Voor het bepalen van de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio S is de aangewezen weg een stapsgewijze aanpak zoals deze is beschreven in het artikel Stapsgewijs bepalen ongedraineerde schuifsterkteparameters.

Voor de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio S resulteert die aanpak in een tweetal stappen (stap 2 heeft alleen betrekking op de grensspanning en ontbreekt dus):

1 Gebruik van standaardwaarden.

3 Bepalen S op basis van laboratoriumonderzoek.

Stap 1: Gebruik van standaardwaarden

Voor de eerste stap is geen grondonderzoek nodig en kan gebruik worden gemaakt van de verstekwaarden in onderstaande tabel. In de tabel is een indicatie gegeven van te verwachten waarden voor de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio S van veel voorkomende grondsoorten. De waarden in de tabel zijn gebaseerd op laboratoriumproeven van diverse projecten. Voor de bepaling van een karakteristieke waarde kan worden uitgegaan van N = 20.

Tabel Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio S van veel voorkomende grondsoorten met koppeling aan de SOS-eenheden. Het betreft waarden bij grote rek (ultimate state).

Grondsoort	SOS-eenheid	Bandbreedte van *S* [-] [1)]	Verwachtingswaarde *S* [-]	Standaard-afwijking *S* [-] [2)]	Variatie-coëfficiënt *S* [-] [2)]
Veen mineraalarm	H_Vhv_v	0,28 – 0,54	0,42	0,04	0,09
Verslagen veen/ detritus	H_Vhv_v, H_Ml_ko	0,29 – 0,43	0,38	0,03	0,10
Veen kleiig	H_Rk_vk	0,24 – 0,38	0,29	0,03	0,12
Veen compact	H_Vbv_v	0,30 – 0,33	0,31	0,03	0,09
Gyttja	Diversen[4)]	0,27 – 0,34	0,30	0,03	0,10
Klei venig / klei organisch	H_Mp_ko, H_Ml_ko, H_Rr_o&z, H_Rk_k&v, H_Rk_ko	0,16 – 0,38 [3)]	0,29	0,06	0,20
Klei	Klei H_Mp_k, H_Rk_k, P_Mp_k, P_Om_k, P_Ova_sd	0,22 – 0,28	0,25	0,03	0,10
Klei zandig en siltig	H_Mr_kz, H_Mkw_z&k, H_Ro_z&k, P_Rk_k&s, P_Rbk_z&s	0,20 – 0,50	0,30	0,03	0,10
Löss[5)]	P_Wls_s	0,20 – 0,50	0,35	0,04	0,10
Keileem[6)]	P_Gkl_kz	0,10 – >1.0	--	--	--

Dijksmateriaal[7)]	H_Aa_ht	0,20 – 0,50	0,31	0,06	0,20

1) De lage waarde kan als karakteristieke ondergrenswaarde worden toegepast.
2) In de standaardafwijking en variatiecoëfficiënt is rekening gehouden met uitmiddeling van onzekerheid langs het schuifvlak, zodat deze waarden zonder verdere bewerking kunnen worden toegepast in D-Soil Model en Riskeer.
3) S = 0,20 mag als karakteristieke ondergrens worden toegepast, hoewel incidenteel lagere waarden kunnen worden aangetroffen.
4) Gyttja kan voorkomen in de volgende SOS: eenheden: H_Mp_ko, H_Ml_ko, H_Rr_o&z, H_Rk_k&v, H_Rk_ko, H_Rk_vk, H_vhv_v, H_vbv_v.
5) De waarden voor löss zijn indicatieve waarden op basis van literatuur.
6) De lage waarde bij Keileem betreft de triaxiaal extensie modus; bij Keileem is anisotropie van de ongedraineerde schuifsterkte relevant (zie Ongedraineerde schuifsterkte van zware zandige siltige klei). Vanwege de grote spreiding zijn verwachtingswaarden en standaardafwijking niet te geven.
7) Voor dijksmateriaal boven het freatisch vlak bij hoogwater wordt de hoek van inwendige wrijving toegepast.

Stap 3: Bepalen *S* op basis van laboratoriumonderzoek

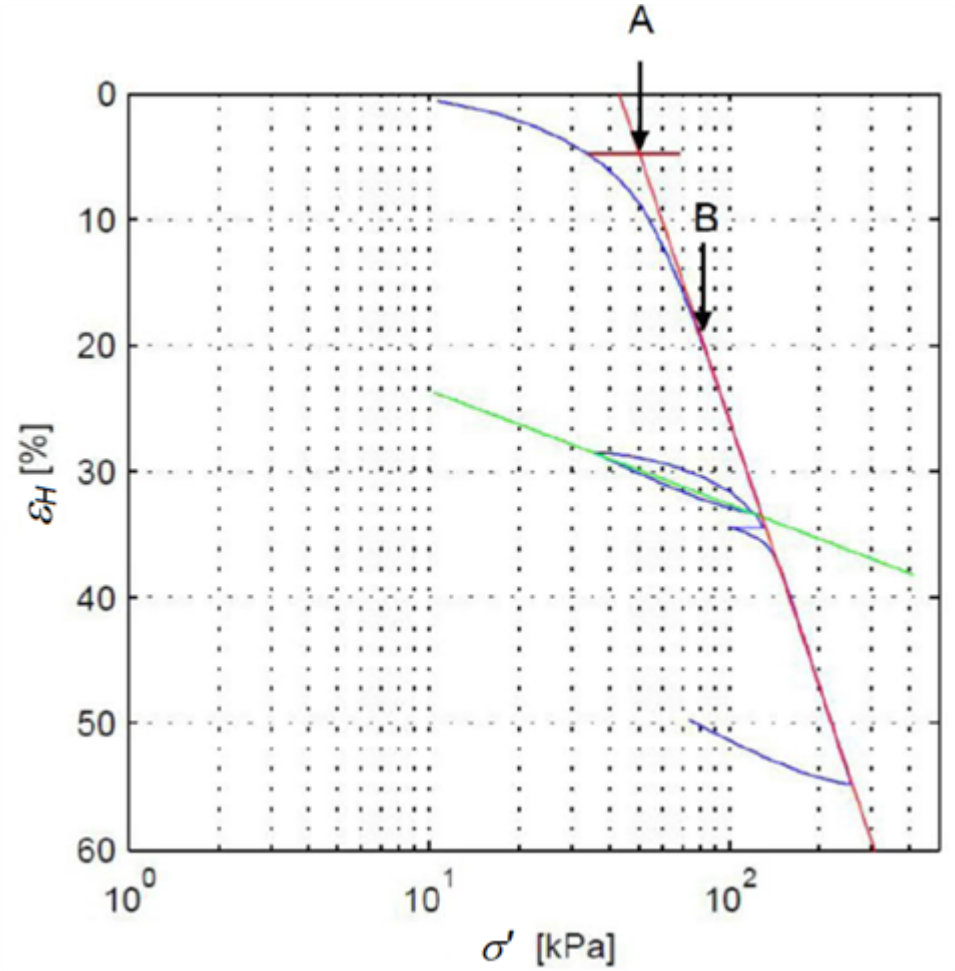
Wanneer een tweede stap met laboratoriumonderzoek nodig is, zijn er twee procedures om de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio S te bepalen:

1. Op normaal geconsolideerde monsters.
2. Op overgeconsolideerde monsters.

Beide procedures worden hieronder beschreven en ook een in de praktijk eerder gehanteerde procedure die echter moet worden ontraden. Een uitgewerkt twee uitgewerkte voorbeelden van de bepaling wordt gegeven in Voorbeelden bepalen normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S.

Procedure 1: Uitgaan van normaal geconsolideerde monsters

Normaal geconsolideerde monsters worden verkregen door te consolideren bij de spanning waar de gemeten zettingscurve van een samendrukkingsproef of een CRS-proef de raaklijn langs de maagdelijke tak van de zettingscurve het eerst raakt, zie de figuur, punt B. Op deze monsters worden ongedraineerde triaxiaalproeven (TX) of ongedraineerde direct simple shear (DSS) proeven uitgevoerd. De grote-rekwaarde (ultimate state) van de halve deviatorspanning t_d (= s_u) uit deze proeven gedeeld door de gekozen consolidatiespanning σ'_{vc} geeft de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio S. Met de analyses zoals beschreven Veel voorkomende verdelingsfuncties worden de verwachtingswaarden, standaardafwijkingen en karakteristieke waarden bepaald.



Figuur Rek tegen spanning in een CRS proef. De horizontale lijn bij A is het rekniveau bij de terreinspanning σ'_{vi} (in de figuur ca. 35 kN/m²). De spanning bij A is de gangbare definitie voor de grensspanning (in de figuur ca. 50 kN/m²). De spanning bij B is de bovengrens voor de grensspanning (in de figuur ca. 83 kN/m²).

Voordeel van deze werkwijze is dat iedere proef meteen S oplevert. Combinatie van gegevens uit verschillende proeven is niet nodig. Effecten van monsterverstoring tijdens het steken van het monster spelen bij deze procedure geen rol. Nadeel van deze procedure is dat door het opleggen van de relatief hoge consolidatiespanningen de natuurlijke structuur van het monster verloren gaat en daarmee ook een deel van de sterkte.

Procedure 2: Uitgaan van overgeconsolideerde monsters

De te beproeven monsters worden geconsolideerd bij de op basis van volumegewichten en dagelijkse gemiddelde waterspanningen geschatte in situ verticale effectieve spanning σ'_{vi}. Aangezien mag worden verondersteld dat de grensspanning veelal hoger ligt dan de verticale effectieve spanning is de grond van deze monsters overgeconsolideerd. Op deze monsters worden ongedraineerde TX- of DSS-proeven uitgevoerd. De ongedraineerde schuifsterkte (s_u), oftwel de halve deviatorspanning t_d bij grote rek (ultimate state), uit deze proeven gedeeld door de consolidatiespanning σ'_{vc} (in dit geval gelijk aan de in situ verticale effectieve spanning σ'_{vi}) geeft de overgeconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio $(s_u/\sigma'_{vc})_{OC}$.

Uit samendrukkingsproeven of CRS-proeven op een ander monster (direct erboven of eronder) is eerder de grensspanning σ'_{vy} en de overconsolidatieratio OCR afgeleid. De regressielijn door de punten van $(s_u/\sigma'_{vc})_{OC}$ tegen de OCR geeft S (en tevens de sterktetoename-exponent m) (zie de figuur

in het artikel Sterktetoename-exponent m). Monster(paren) van verschillende dieptes en van naast en onder de dijk (wel binnen dezelfde grondlaag of SOS-eenheid!) zorgen voor de benodigde range in *OCR*-waarden.
Voordeel van deze werkwijze is dat het monster in de TX- of DSS-proeven tijdens de consolidatie niet wordt belast met een hoge spanning, zodat de natuurlijke structuur die de grond heeft opgebouwd in het veld zoveel mogelijk intact blijft (op voorwaarde dat geen monsterverstoring is opgetreden tijdens het steken van het monster). Nadeel kan zijn dat de proeven bij zeer lage spanningen moeten worden uitgevoerd, waarbij de meetnauwkeurigheid van de apparatuur een significante rol gaat spelen. Een ander nadeel is dat de schuifsterkte en de grensspanning en *OCR* noodzakelijkerwijze worden bepaald op verschillende monsters (van mogelijk iets verschillende samenstelling en historie). Deze werkwijze om *S* te bepalen is economisch als gelijktijdig een correlatie wordt opgesteld tussen de ongedraineerde schuifsterkte en de sondeerweerstand (bepaling van de conusfactor N_{kt}; zie artikel Ongedraineerde sterkte bepalen uit correlaties met sonderingen).

Ontraden methode

Daarnaast is in de praktijk nog een alternatieve methode toegepast, waarbij monsters voor ongedraineerde triaxiaalproeven of ongedraineerde DSS-proeven eerst worden geconsolideerd bij een hoge spanning boven de grensspanning (> B in bovenstaande figuur) en vervolgens worden ze opnieuw geconsolideerd bij een lagere spanning. Dit resulteert in een bekende aan het monster opgelegde *OCR*. Zowel de 'pre'-consolidatiespanning als de proef-consolidatiespanning waarbij de afschuiffase wordt uitgevoerd, kunnen vrij gekozen worden zodat een range van *OCR* waarden wordt verkregen. De regressielijn door de punten van $(s_u/\sigma'_{vc})_{oc}$ tegen de *OCR* geeft *S* (en tevens de sterktetoename-exponent m) . Deze procedure heeft als nadeel dat de structuur van de grond wordt verstoord, waardoor een deel van de sterkte van het monster verloren gaat. Door dit nadeel wordt afgeraden deze methode te gebruiken.

Nabeschouwing

De twee aanbevolen procedures leiden ten gevolge van de genoemde voor- en nadelen niet tot dezelfde resultaten. Een analyse van de verschillende proevenseries waarbij gemiddelden en standaardafwijkingen vergeleken worden geeft inzicht in de grootte van de onzekerheden in de parameters en maakt een goed gefundeerde keuze mogelijk.

Procedure 1 is in de uitvoering en uitwerking iets eenvoudiger dan procedure 2. Bij het van grof naar fijn werken kan desgewenst eerst methode 1 worden toegepast. Hiermee wordt alleen de parameter *S* bepaald. Indien vervolgonderzoek nodig is, kan alsnog methode 2 worden toegepast. Het nadeel hiervan is dat het veld- en laboratoriumonderzoek opnieuw moet worden uitgevoerd. Het kan daarom zinvol zijn om direct methode 2 toe te passen. Deze keuze kan vooraf worden onderbouwd door resultaten van gevoeligheidsberekeningen.

Voor de halve-deviatorspanning t_d worden de grote-rekwaarden (ultimate state) uit de eentraps ongedraineerde TX-proeven (klei) en DSS-proeven (veen) genomen.

Voor veen worden voor de bepaling van de ongedraineerde schuifsterkteratio *S* voor het uitvoeren van stabiliteitsanalyses DSS-proeven uitgevoerd. De grote-rekwaarden (ultimate state) van de ongedraineerde schuifsterkteratio *S* uit direct simple shear-proeven kunnen tot verwachtingswaarden van de ongedraineerde schuifsterkteratio worden verwerkt als aangegeven in Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio *S* (bepalen uit laboratoriumproeven).

Door de uitgevoerde proeven te ordenen naar grondsoort, geologische afzetting en eventueel het volumegewicht of organische stof gehalte ontstaan groepen van proeven die bij elkaar horen. Per groep van bij elkaar behorende proeven kunnen de verwachtingswaarde en de standaardafwijking

van de ongedraineerde schuifsterkteratio S worden bepaald.
Er zijn spreadsheets met documentatie beschikbaar, die kunnen worden gebruikt om de parameter S volgens procedure 2 af te leiden uit resultaten van laboratoriumproeven. Met deze spreadsheets worden ook standaardafwijkingen en karakteristieke waarden bepaald.

De ongedraineerde schuifsterkteratio neemt globaal genomen toe als het volumegewicht afneemt. Dat wil zeggen dat de ongedraineerde schuifsterkteratio van Hollandveen en Basisveen hoger is dan de ongedraineerde schuifsterkteratio van de verschillende kleien.

De interpretatie van de meetgegevens is bij de direct simple shear-proef niet vanzelfsprekend, omdat niet alle spannings-componenten (horizontale druk in membraan, schuifspanningen) bekend zijn en de oriëntatie van een eventueel afschuifvlak onbekend is. De literatuur geeft diverse manieren om de direct simple shear-proef uit te werken. De grote rek waarde (ultimate state) van de ongedraineerde schuifsterkte $s_{u,e}$ wordt vaak gelijkgesteld met de schuifsterkte bij het einde van de proef τ_e.

Voorbeeld

Voor de interpretatie van de triaxiaalproeven en direct simple shear proeven wordt verwezen naar Voorbeelden bepalen normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio [-].

Versie 1.0: 2 juli 2025

Sterktetoename-exponent m

De sterktetoename-exponent m is een parameter die in het SHANSEP-schuifsterktemodel in combinatie met de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de grensspanning σ'_{vy} wordt gebruikt voor het karakteriseren van de ongedraineerde schuifsterkte s_u.

De sterktetoename-exponent bepaalt de mate waarin het effect van de belastinggeschiedenis (grensspanning σ'_{vy}, overconsolidatieratio OCR) doorwerkt in de ongedraineerde schuifsterkte. De parameter m wordt voor een probabilistische berekening (Riskeer) beschreven als stochast met verwachtingswaarde en standaardafwijking en een lognormale verdeling.

Inleiding

De sterktetoename-exponent bepaalt de mate waarin de ongedraineerde schuifsterkte van overgeconsolideerde grond gevoelig is voor veranderingen in de verticale effectieve spanning σ'_{vi}. De verticale effectieve spanning kan lokaal afnemen als gevolg van een toename in de waterspanning door toenemende infiltratie vanuit een onderliggende aquifer, of juist toenemen door consolidatie die optreedt na een extra bovenbelasting.

Als m = 1 wordt elke verandering in effectieve spanning volledig gecompenseerd door de even grote verandering van OCR en blijft s_u gelijk. Als m = 0,5 dan leidt een relatieve afname van de effectieve spanning tot een even grote relatieve toename van OCR, maar de OCR werkt door de lage waarde van m minder hard door in de s_u en dus neemt s_u af door de afname van de effectieve spanning.

Voor het bepalen van de ongedraineerde schuifsterkteparameters is de aangewezen weg een stapsgewijze aanpak zoals deze is beschreven in het artikel Stapsgewijs bepalen ongedraineerde schuifsterkteparameters.

Voor de normaal geconsolideerde ongedraineerde sterktetoename-exponent m resulteert die aanpak in een tweetal stappen (stap 2 heeft alleen betrekking op de grensspanning en ontbreekt dus):

1. Gebruik van standaardwaarden.

2. Bepalen m op basis van laboratoriumonderzoek.

Stap 1: Gebruik van standaardwaarden

De waarde van m ligt tussen 0,5 en 1,0. Een gangbare waarde is 0,8. Die waarde kan worden toegepast als karakteristieke ondergrenswaarde. De verwachtingswaarde voor Nederlandse grondsoorten is 0,9 met variatiecoëfficiënt 0,03. In de variatiecoëfficiënt is rekening gehouden met uitmiddeling van onzekerheid langs het schuifvlak, zodat deze waarde zonder verdere bewerking kan worden toegepast in D-Soil Model en Riskeer.

Stap 2: Bepalen m op basis van laboratoriumonderzoek

Met behulp van laboratoriumonderzoek kan de sterktetoename-exponent m op twee manieren worden bepaald.

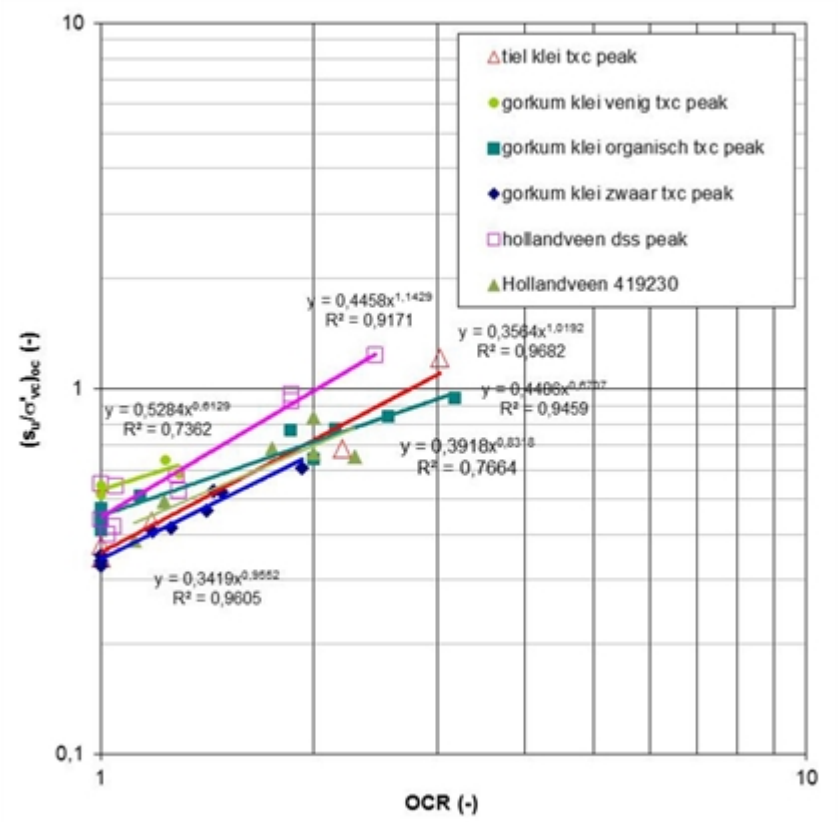
1. Door het uitvoeren van triaxiaalproeven of direct simple shear proeven bij verschillende waarden van de overconsolidatieratio OCR. De triaxiaalproeven of direct simple shear proeven worden geconsolideerd bij de geschatte in situ verticale effectieve spanning σ'_{vi}. Deze proeven resulteren in een overgeconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio $(s_u/\sigma'_{vc})_{oc}$. De regressielijn door de punten van $(s_u/\sigma'_{vc})_{oc}$ tegen de OCR geeft de sterktetoename-exponent m. Bij deze werkwijze worden de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio [-] volgens procedure 2 (zie de paragraaf Procedure 2: Uitgaan van overgeconsolideerde monsters in het hiervoor genoemde artikel) en de sterktetoename-exponent m in samenhang bepaald.
2. Door het uitvoeren van samendrukkingsproeven of CRS-proeven en het hieruit afleiden van de isotachen parameters a_{it} en b_{it}. De parameter a_{it} is de herbelast parameter en b_{it} is de maagdelijke samendrukkingsparameter. Op basis van a_{it} en b_{it} wordt bepaald uit $m = (b_{it} - a_{it}) / b_{it}$. Deze relatie is gelijkwaardig aan vergelijkbare relaties op basis van de critical state samendrukkingsparameters of Bjerrum samendrukkingsparameters.

De methode met triaxiaalproeven of direct simple shear proeven, waarbij de ongedraineerde schuifsterkte ratio S en de sterkte toename exponent m in samenhang worden bepaald, heeft inhoudelijk de voorkeur. Dit omdat deze wijze van bepaling van m gerelateerd is aan de bepaling van de schuifsterkte. Deze methode geeft onzekerheid door onzekerheid over de OCR en door het combineren van verschillende monsters met verschillende sterkte door heterogeniteit. In geval van onrealistisch hoge waarden van m (> 1,0) worden de waarden van m volgens de methode met samendrukkingsproeven of CRS-proeven als bovengrens genomen.

Er zijn spreadsheets met documentatie beschikbaar op de Github van het Kennis en Kunde Platform, die kunnen worden gebruikt om de parameter m volgens de procedure met triaxiaalproeven en direct simple shear proeven bij verschillende waarden van OCR af te leiden. Met deze spreadsheets worden ook standaardafwijkingen en karakteristieke waarden bepaald.

Voorbeeld

In Figuur 1 is de relatie tussen de (overgeconsolideerde) ongedraineerde schuifsterkteratio $(s_u/\sigma'_{vc})_{oc}$ en de overconsolidatieratio OCR weergegeven. De trendlijnen geven voor vijf grondsoorten de relatie $(s_u/\sigma'_{vc})_{oc} = S \cdot OCR^m$ weer die conform het SHANSEP-model het verband legt tussen de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio S en de overgeconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio $(s_u/\sigma'_{vc})_{oc}$ met de overconsolidatieratio OCR en de sterktetoename-exponent m. De ratio $(s_u/\sigma'_{vc})_{oc}$ bij $OCR = 1$ is gelijk aan de normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio S. De exponent in de vergelijkingen van de trendlijnen in onderstaande figuur is de sterktetoename-exponent m.



Figuur 1 Relatie tussen de overgeconsolideerde ongedraineerde schuifsterkteratio $(s_u/\sigma'_{vc})_{OC}$ en de overconsolidatieratio OCR. Merk op dat in sommige fits de macht m >1 (fysisch niet realistisch) als gevolg van ruis in de metingen bij lage spanning.

Wanneer de consolidatiespanning van triaxiaalproeven of direct simple shear proeven gelijk is aan de geschatte in situ verticale effectieve spanning σ'_{vi} kan dit betekenen dat de laboratoriumproeven bij zeer lage spanningen moeten worden uitgevoerd. De meetnauwkeurigheid van de apparatuur kan daarbij een significante rol gaan spelen.

Transitional soils

Bij toepassing van het SU-tabel-model voor transitional soils is ook de sterktetoename-exponent m nodig. Op transitional soils kan de CSSM-theorie worden toegepast, indien er vanuit wordt gegaan, dat elke initiële toestand van de grond een bijbehorende 'critical state line' heeft. Het is daarom aannemelijk dat het toepassen van de sterktetoename-exponent m realistisch is voor transitional soils en dat de waarde van m voor transitional soils vergelijkbaar is met m van andere materialen. Wanneer voor transitional soils de exponent m wordt bepaald op de hiervoor genoemde manier door het uitvoeren van samendrukkingsproeven of CRS-proeven en het hieruit afleiden van de isotachen parameters a en b, dan wordt een waarde voor m gevonden, die vergelijkbaar is met m van andere materialen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Freatische en elastische waterberging in grond

De (water)berging in grond is een fenomeen waarmee rekening moet worden gehouden bij grondwaterstromingsberekeningen. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen freatische berging en elastische berging.

Freatische berging treedt op als bij een stijgende, vrije grondwaterspiegel de holle ruimten in het korrelskelet van de grond met water gevuld raken. De kenmerkende parameter voor freatische berging is de porositeit van de grond (n). Maar omdat nooit alle poriën geheel met water worden gevuld en omdat de poriën boven het freatisch vlak al deels gevuld zijn met water, gebruikt men in dit verband een zogenaamde effectieve porositeit. Deze effectieve porositeit is heel erg situatieafhankelijk. Een richtwaarde voor de effectieve porositeit bedraagt 70% van de porositeit n.

Elastische berging doet zich voor wanneer de effectieve grondspanning verandert. Dit is het geval als de grondwaterspanning toeneemt bij gelijkblijvende grondspanning (totaalspanning). Hierdoor neemt de korrelspanning van de grond af, en het korrelskelet dat onder invloed van de korrelspanning was ingedrukt, zal dan bij benadering elastisch uitzetten. Daarbij neemt het porievolume toe, er ontstaat ruimte die door water kan worden gevuld.

De samendrukking van poriewater ten gevolge van de drukverhoging is in de praktijk vrijwel nihil. Maar als er een fractie lucht (of methaan) in het grondwater aanwezig is, dan kan die ook comprimeren, hetgeen resulteert in extra bergend vermogen. Deze effecten worden in rekening gebracht in het consolidatieproces via de consolidatiecoëfficiënt, waarin de eigenschappen van stroming en berging zijn verdisconteerd. Onder het kopje Elastische berging berekenen is aangegeven hoe de bergingscoëfficiënt (welke direct is gerelateerd aan de consolidatiecoëfficiënt) kan worden berekend.

Veranderingen in de freatische berging en elastische berging treden op bij niet-stationaire grondwaterstroming. Daarbij is de freatische bergingscapaciteit orden groter dan van elastische bergingscapaciteit. De elastische berging speelt zich echter af in een groter gebied dan de freatische berging.

Elastische berging is gecorreleerd aan de stijfheid van de grond. Hoe stijver de grond, hoe kleiner de rekken en hoe kleiner de elastische berging. Zand is stijf en heeft dus een geringe elastische berging. Klei en veen zijn slap, waardoor elastische berging een grotere rol kan spelen. Bij dikke kleilagen kunnen bij het passeren van een hoogwatergolf de waterspanningen daardoor aanzienlijk lager blijven dan bij een stationaire stroming.

In een zandpakket is de elastische berging meestal te verwaarlozen. Dit geldt zeker als er sprake is van freatisch water in een zandpakket, dan is de freatische berging dominant. Bij spanningswater in zand heeft de elastische berging een merkbaar, maar meestal gering effect ten aanzien van de demping en vertraging van een zich voortplantende drukgolf in het zandpakket.

Elastische berging berekenen

De kenmerkende parameter voor de elastische berging is de specifieke elastische bergingscoëfficiënt S_s [m^{-1}]. Voluit kan de eenheid van deze parameter ook worden omschreven als m^3 water per m^3 grond per m stijghoogte-toename. De specifieke elastische bergingscoëfficiënt volgt uit:

$$S_s = \rho_w g(m_v + n\beta_w) \quad \text{of} \quad S_s = \frac{k}{c_v} \qquad (1)$$

Waarin:

S_s Specifieke elastische bergingscoëfficiënt [m^{-1}].

ρ_w Soortelijke massa van het water [kg/m^3].

g Zwaartekrachtversnelling [m/s^2].

m_v Samendrukkingscoëfficiënt van de grond, het korrelskelet [m²/N].

n Porositeit grond [-].

β_w Samendrukkingscoëfficiënt van het grondwater [m²/N].

k Doorlatendheidscoëfficiënt [m/s].

c_v Consolidatiecoëfficiënt [m²/s].

Globaal geldt voor zand $m_v = 10^{-8}$ à 10^{-7} m²/N, voor klei $m_v = 10^{-7}$ à 10^{-6} m²/N, voor veen $m_v = 9.10^{-7}$ à 3.10^{-6} m²/N en voor water $\beta_w = 10^{-9}$ m²/N. Overigens is als symbool voor de samendrukkingscoëfficiënt ook α vrij veel gehanteerd. Specifiek voor klei- en veenlagen kan de effectieve compressibiliteit van water veel groter zijn door luchtinsluitingen.

Bij grondwaterstroming in afgesloten, watervoerende zandpakketten wordt vaak gebruik gemaakt van de elastische bergingscoëfficiënt S_z [-] voor het gehele zandpakket met een laagdikte D:

Formule: de elastische bergingscoëfficiënt S met subscript z is het soortelijk gewicht van water maal de zwaartekrachtversnelling maal dikte van zandlaag maal (haakje openen) samendrukkingscoëfficiënt van de grond vermeerderd met de porositeit maal de samendrukkingscoëfficiënt van water (haakje sluiten) of de Elastisch bergingscoëfficiënt is de doorlatendheidscoëfficiënt maal de dikte van de zandlaag gedeeld door de consolidatiecoëfficiënt.

$$S_z = \rho_w g D(m_v + n\beta_w) \quad \text{of} \qquad S_z = \frac{kD}{c_v} \qquad (2)$$

Waarin:

S_z Elastische bergingscoëfficiënt van het zandpakket [-].

ρ_w Soortelijke massa van het water [kg/m³].

g Zwaartekrachtversnelling [m/s²].

D Dikte van de zandlaag [m].

m_v Samendrukkingscoëfficiënt van de grond [m²/N].

n Porositeit [-].

β_w Samendrukkingscoëfficiënt van het grondwater [m²/N].

k Doorlatendheidscoëfficiënt [m/s].

c_v Consolidatiecoëfficiënt [m²/s].

De bergingscoëfficiënten van in Nederland voorkomende zandpakketten variëren van 10^{-4} tot 3.10^{-3} [-], anders gezegd een elastische berging van $S_z = 10^{-4}$ à 3.10^{-3} m³ per m² van het zandpakket per meter stijghoogte-toename.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Erosiegevoeligheid/-bestendigheid

De bestendigheid tegen erosie wordt voor klei aangeduid met erosiebestendigheidscategoriën. De categorieën zijn gebaseerd op de samenstelling van de klei, met name de Atterbergse grenzen en de korrelverdeling (lutum en zandgehalte). De Atterbergse grenzen geven de grenzen tussen het vaste, vloeibare en plastische gebied van klei weer. De overgang van de vaste naar plastische fase heet de

uitrolgrens. De overgang van de plastische fase naar vloeibare fase heet de vloeigrens. Deze grenzen worden met proeven in een laboratorium bepaald en worden uitgedrukt in het watergehalte.
Het verschil tussen vloeigrens (W_l) en uitrolgrens (W_p) is de plasticiteitsindex (PI):

$PI = W_l - W_p$ (1)

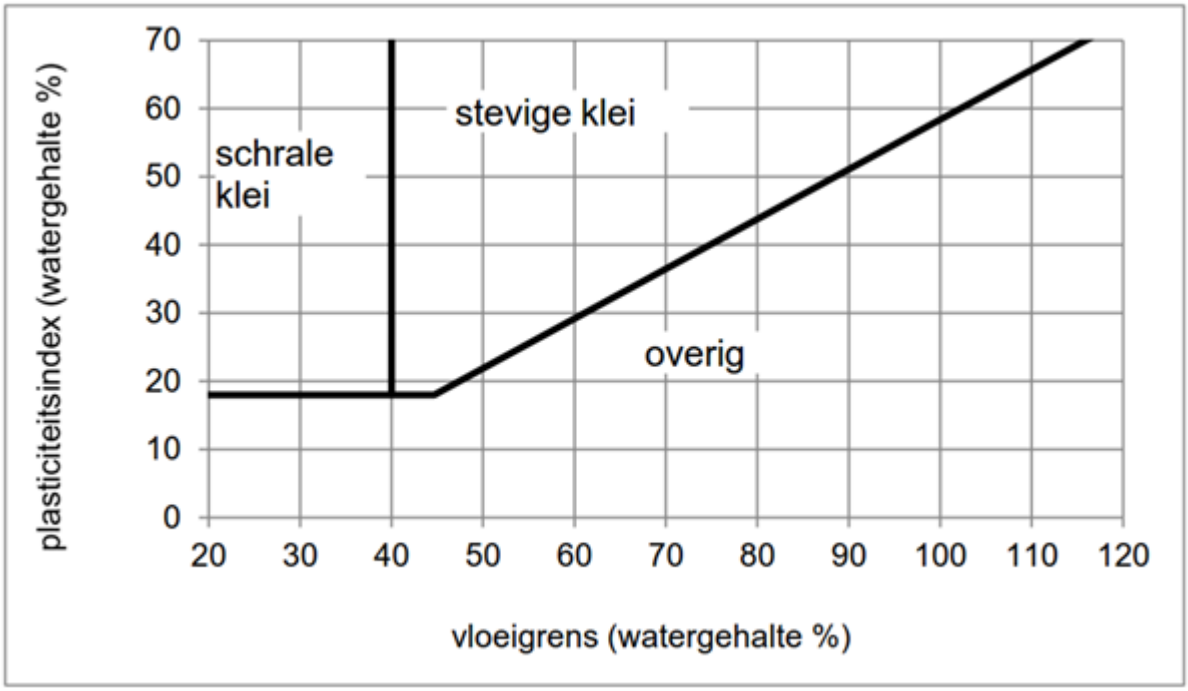
De uitrolgrens wordt bepaald door in het laboratorium met de hand draden te rollen. Het vochtgehalte waarbij nog net draden van 3 mm kunnen worden gerold, wordt de uitrolgrens genoemd.

De vloeigrens wordt meestal bepaald doormiddel van de Casagrande proef of de valconus proef. Bij de Casagrande proef wordt het vochtgehalte bepaald waarbij, in het toestel (bakje) van Casagrande, na 25 slagen, een sleuf in de klei juist dichtvloeit. De valconus methode is echter praktischer en nauwkeuriger en heeft doordoor in veel landen de voorkeur.

De vloeigrensbepaling met behulp van het toestel van Casagrande is omschreven in proef 14 van de Standaard RAW 2015.
De procedure en materiaaleisen voor de valconus proef zijn gegeven in CEN ISO/TS 17892-12.

Er worden in de Nederlandse adviespraktijk voor toepassing van klei bij dijkenbouw 3 categorieën onderscheiden (zie onderstaande figuur):

1. Stevige klei
2. Schrale klei
3. Overig



Figuur 1 Indeling van klei op basis van de Atterbergse grenzen in stevige, schrale en overige klei.

De grenswaarden tussen de categorieën met betrekking tot de Atterbergse grenzen zijn als volgt:

- Een vloeigrens van 40%.
- Een plasticiteitsindex van 0,73*(W_l-20), met een minimum van 18%.

Voor klei toegepast in dijken geldt verder in het algemeen dat:

- Het zandgehalte (% > 63 µm) maximaal 40% bedraagt.
- Het afkomstig is van een op natuurlijke wijze afgezet materiaal, of gerijpte klei of specie/slib.
- Het organische stofgehalte minder dan 5% bedraagt (proef 36 RAW-Bepalingen 2015).
- Er minder dan 25% gewichtsverlies is bij HCL-behandeling (proef 37 RAW-Bepalingen 2015).
- Er zijn geen significante bijmengingen van puin, grind en dergelijke en de klei heeft weinig heldere (rode, bruine en gele soms blauwe) verkleuringen.
- Het zoutgehalte van het bodemvocht maximaal 4 g/l bedraagt.

In zijn algemeenheid kan er pas sprake zijn van klei bij een lutumgehalte (% < 2 µm) van meer dan 8%.

Met de overgang naar de NEN-EN-ISO 14688-1+2 wordt met de classificatie beter aangesloten op de indeling conform plasticiteitsgrenzen dan met de oude indeling (NEN5104) op basis van korrelverdelingen.

De in Nederland voorkomende klei ligt vaak boven de A-lijn (0,73*(W_l-20)). In de praktijk komt het voor dat 'stevige klei' toch in de categorie 'schrale klei' komt. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door afwijkingen bij het, volgens de norm, bepalen van de Atterbergse grenzen.

Klei die niet aan de genoemde eisen voldoet is niet per definitie ongeschikt om toe te passen. Mits gemotiveerd kan worden afgeweken van bovenstaande eisen, zie ook Handboek dijkenbouw [Halter, 2018]. Verder wordt in het rapport Vier quick wins grond en klei [Senhorst, 2018] een bandbreedte aangegeven voor de vloeigrens (W_l) van ≤ 2% en voor de plasticiteitsindex (PI) ≤ 3%. Daarnaast is aanbevolen om onder voorwaarden een hoger organisch stofgehalte en/of zoutgehalte toe te staan.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Verwerking van grondmaterialen tijdens uitvoering

Klei en silt

Voor het goed kunnen verwerken van cohesief materiaal (klei en silt) dient deze zo plastisch (vochtig/nat) te zijn dat kluiten goed door grondverzetmachines tot een samenhangend geheel verdicht kunnen worden. Anderzijds dient het materiaal voldoende hard/stijf (droog) te zijn om voldoende draagkracht te bieden aan de banden en tracks van grondverzetsmachines.

De plasticiteit en dus de verwerkbaarheid worden sterk bepaald door het watergehalte. Als klei of silt erg nat is, zal door de hoge plasticiteit en de geringe draagkracht de verwerkbaarheid beperkt zijn. Als klei of silt daarentegen te droog is, zijn de kluiten vaak zo hard dat verdichten alleen in de bovenste centimeters effectief is [Technisch rapport klei voor dijken, 1996].

De consistentie-index (I_c) is een parameter die iets zegt over de plasticiteit en verwerkbaarheid van cohesief materiaal (klei en silt). De consistentie-index is gedefinieerd als [NEN, 2020]:

$I_c = (w_l - w) / I_p$ (1)

Waarin:
I_c Consistentie-index [-].
w_l Vloeigrens [-].
w Watergehalte [-].
I_p Plasticiteitsindex [-].

Voor de verwerking van deklagen geldt een eis aan de consistentie-index van $I_c \geq 0{,}75$. Voor de verwerking van klei in de kern van een dijk geldt een consistentie-index eis van $I_c \geq 0{,}6$ [Technisch

rapport, 1996].

Tabel 1 Consistentie-index van klei en silt [NEN, 2020]

Omschrijving	**Consistentie-index I_c**
Zeer slap	< 0,25
Slap	0,25 tot 0,50
Stevig	0,50 tot 0,75
Vast	0,75 tot 1,00
Zeer vast	> 1,00

In de huidige praktijk wordt klei vaak aangebracht in lagen van soms 0,2 m tot 0,4 m dikte. De eisen voor verdichting van klei en zand zijn opgenomen in de [Standaard RAW, 2020]. Voor de controle op de verdichting kan gebruik gemaakt worden van een verdichtingsplan [Senhorst, 2018].

Voor eisen van verdichting moet de dichtheid van klei ten minste 97% van de proctordichtheid bedragen. Voor deze dichtheidsgraad geldt een maximaal watergehalte dat ligt tussen het optimale watergehalte (w_{opt}) uit de proctorproef en het watergehalte behorend bij de vereiste consistentie-index (I_c) [Technisch rapport, 1996].

Zand

Zand laat zich relatief makkelijk verwerken. Door het materiaal met het juiste vochtgehalte in dunne lagen uit te spreiden en de verwerking (bulldozers) versporend te laten plaatsvinden wordt tijdens het inbrengen de vereiste dichtheid bereikt. In sommige gevallen kan het nodig zijn om aanvullend te verdichten met een trilplaat of trilwals, teneinde de in het bestek voorgeschreven verdichting te behalen.

Het watergehalte van verdichten zand ligt bij voorkeur tussen circa 8 à 15 % (massapercentage). Indien zand, tijdens het aanbrengen, te droog is kan er water worden gesproeid. Het optimale watergehalte voor verdichten volgt uit de proctorproef en wordt bepaald in relatie tot de hoogst verkregen droge dichtheid bij de verdichtingsenergie van de proctorproef [Halter, 2018]. De resultaten van de proctorproef worden gebruikt voor verdichtingscontrole.

Verdichtingscontrole van zand kan plaatsvinden met behulp van steekringen, waarbij de droge dichtheid bepaald en getoetst wordt aan de maximum proctordichtheid, conform de eisen uit de [Standaard RAW-2020]. Daarnaast kan de dichtheid ook met andere methoden bepaald worden. Mogelijkheden hiervoor zijn doormiddel van nucleaire dichtheidscontrole met een zogenaamd Troxler-apparaat, (hand)sonderingen of plaatdrukproeven.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Meet- en onderzoekstrategie voor grondeigenschappen (inclusief dichtheid)

Grondeigenschappen kunnen worden bepaald met laboratoriumproeven. Sonderingen kunnen daarnaast ingezet worden om de schuifsterkte in beeld te brengen met behulp van correlaties, zie [Van Duinen, 2014]. Hierbij speelt een combinatie van grondeigenschappen en lokale eigenschappen over de toestand van de grondlagen een rol. Meer informatie is gegeven in het artikel Ongedraineerde sterkte uit correlaties met sonderingen. Hierin ligt de focus op de strategie voor het laboratoriumonderzoek.

De strategie hangt af van de fase waarin het project zich bevindt, de reeds beschikbare informatie en de specifieke behoefte voor aanscherping van de waarde van de parameters. In sommige gevallen heeft een beheerder al een uitgebreide proevenverzameling tot zijn beschikking of zijn er juist specifieke correlaties afgeleid voor het afleiden van sterkte uit sonderingen.

Het vaststellen van de grondopbouw, is daarom een noodzakelijke eerste stap. Voor de verschillende grondsoorten kan vervolgens met behulp van laboratoriumproeven de eigenschappen worden bepaald (zoals de sterkte en de stijfheid van de grondsoorten).

Het aantal laboratoriumproeven dat nodig is om de waarde voor een grondeigenschap af te leiden wordt meestal bepaald op basis van ervaring. Vanuit statistisch oogpunt zijn ten minste 6 proeven per grondlaag een veelgebruikte hoeveelheid. Meer informatie over de statistische achtergrond is opgenomen in het artikel Karakteristieke waarde op basis van een lokale proevenverzameling. Het optimum van het aantal proeven per grondlaag bevindt zich tussen de 6 en 10 proeven, maar meer proeven levert meestal geen aanscherping van de parameters op. Indien de spreiding op de parameters bij meer dan 10 proeven groot blijft, kan het nuttig zijn om opnieuw naar de grondsoorten te kijken. Het is mogelijk dat een andere indeling wenselijk is. Het bepalen van de grondeigenschappen op basis van laboratoriumproeven is dus een iteratief proces. Bij het opzetten van een onderzoeksstrategie kan het nuttig zijn hierop te anticiperen.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Geotechnische boringen en boormonstername voor grondeigenschappen

Boringen worden veelal gebruikt voor het classificeren van verschillende grondlagen en -soorten (zie artikel Geotechnische boringen en boormonstername voor de grondopbouw). Op basis van de grondsoort uit de boring kunnen met behulp van tabel 2b uit de NEN-EN 1997-1 Eurocode 7 [NEN, 2019] de belangrijkste grondeigenschappen worden geïdentificeerd. Boringen lenen zich ook uitermate goed voor het bemonsteren van grond, in tegenstelling tot sonderingen. Er zijn twee verschillende manieren voor het bemonsteren van grond: geroerd en ongeroerd.

Grondmonsters met geroerde (gemengde) grond worden gebruikt om grond te beschrijven en te classificeren. Bij ongeroerde (gestoken) monsters blijft de originele grondopbouw behouden, wat het geschikt maakt voor sterkte- en stijfheidsproeven in het laboratorium.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Erosiemetingen voor grondeigenschappen

Erosiebestendigheid is een belangrijke grondeigenschap voor materialen in een dijk. De erosiebestendigheid is gedefinieerd als de weerstand van een grondlaag tegen erosie. Bij hydraulische belastingen lager dan de weerstand treedt er geen erosie op. De standtijd tegen erosie van zowel de deklaag als de kern van de dijk zijn een maat voor hoe lang de dijk bestand is tegen een

hoogwatersituatie (inclusief golven). Hierbij geldt dat de erosiebestendigheid van klei veel groter is dan die van zand.
De erosiebestendigheid van klei is afhankelijk van de samenstelling van de grond. Met behulp van laboratoriumproeven (zie artikel Laboratoriumonderzoek voor grondeigenschappen) is het mogelijk om de volgende eigenschappen van de grond vast te stellen:

- Atterbergse grenzen (vloeigrens, uitrolgrens en plasticiteitsindex).
- Zandgehalte.
- Lutumgehalte.
- Zoutgehalte.
- Kalkgehalte.
- Organische stofgehalte.

De indeling van klei op basis van erosiebestendigheid is vastgelegd in artikel Erosiegevoeligheid/-bestendigheid. Daarnaast wordt de erosiebestendigheid van de grasmat behandeld in Graskwaliteit.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Laboratoriumonderzoek voor grondeigenschappen

Voor het bepalen van grondeigenschappen van de verschillende grondsoorten zijn meerdere laboratoriumproeven beschikbaar. In Tabel 1 (tabel 4.4.1 uit het [Technisch rapport waterkerende grondconstructies, 2001]) zijn de meest gangbare onderzoekstechnieken (zowel laboratorium- als terreinproeven) uitgezet tegen de verschillende grondkarakteristieken. In Tabel 2 (tabel 4.4.2 uit hetzelfde rapport) is dit nog een keer gedaan, maar dan met meer specialistische onderzoekstechnieken.

Tabel 1 Gangbare onderzoeksmethodieken.

	Sonderingen	**Boringen**	**Bepaling volumieke massa**	**Zeefproef**	**Bepaling plasticiteit**	**Metingen waterspanningen**	Samendrukkingsproef	**Traxiaalproef**
Paragraaf of referentie Grondkarakteristieken	4.4.3	4.4.4	Cur 162	6.0[1]	15[1]	4.4.7	4.4.12	NEN 5117
Samendrukbaar							X	

heid						
Horizontale vervorming						
Grondlagindeling	X	X				
Laagdikte	X	X				
Doorlatendheid			X[2]			
Schuifsterkte (ongedraineerd)						X
Wrijvingshoek (effectief)						X
Cohesie (effectief)						X
Waterspanningen en stijghoogte				X		
Verdichtingsgraad						
Hydraulische						

weerstand										
Korrelverdeling					X					
Classificatie	X		X							
Volumieke massa				X						
Plasticiteitsindex						X				

Tabel 2 Specialistische onderzoeksmethodieken.

	Nucleaire dichtheidsmeting	**Steekringmethode**	**Elektrische dichtheidsmeting**	**Vinproef**	**Pressio-, dilato, conepressuremeter**	**Pomp/putproeven**	Infiltratieproef	**Doorlatendheidsproef (laboratorium)**	**Directe schuifproef**	**DSS-proef**
Paragraaf of referentie	4.6[1]	4.4.4[1]	4.4.8	4.4.5	4.4.6	4.4.9	4.4.10	4.4.11	4.4.13	4.4.13
Grondkarakteristieken										
Samendruk										

baarheid								
Horizontale vervorming			X					
Grondlaagindeling								
Laagdikte								
Doorlatendheid			X	X	X	X		
Schuifsterkte (ongedraineerd)		X	X				X	X
Wrijvingshoek (effectief)							X	X
Cohesie (effectief)								
Waterspanningen en stijghoogte								

Verdichtingsgraad	X		X		X				
Hydraulische weerstand							X	X	X
Korrelverdeling									
Classificatie									
Volumieke massa	X								
Plasticiteitsindex									

[1] Verwijst maar het desbetreffende proefnummer in de Standaard RAW-bepalingen [CROW, 2020].

[2] Indicatief ten behoeve van VO berekeningen.

In bovenstaande tabellen wordt verwezen naar de desbetreffende paragraaf uit het Technisch rapport waterkerende grondconstructies, het proefnummer in de [Standaard RAW Bepalingen, 2020] of de NEN-norm waarin de proef staat beschreven.

- Sonderingen
- Boringen
- Bepaling volumieke massa (CUR 162, staat niet online)
- Zeefproef (Standaard RAW-bepalingen, staat niet online)
- Bepaling plasticiteit (Standaard RAW-bepalingen, staat niet online)
- Metingen waterspanningen
- Samendrukkingsproef
- Triaxiaalproef (NEN 5117, staat niet online)
- Nucleaire dichtheidsmeting (Standaard RAW-bepalingen, staat niet online)
- Steekringmethode (Standaard RAW-bepalingen, staat niet online)
- Elektrische dichtheidsmeting
- Vinproef

- Pressio-, dilato-, cone pressuremeter
- Pomp/putproeven
- Infiltratieproef
- Doorlatendheidsproef
- Directe schuifproef
- DSS-proef

In de ‘Handreiking eenduidig aanbesteden volgens NEN-EN-ISO 14688’, opgesteld door Vereniging Ondernemers Technisch Bodemonderzoek, is samengevat welk type geotechnische boring geschikt is voor de bovengenoemde laboratoriumproeven.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Gebruik waarden voor grondeigenschappen uit Normen en Richtlijnen

Gegevensbronnen (normen en richtlijnen) zoals: de NEN, EuroCode, STOWA, CUR, CROW en dergelijke bevatten vaak algemene conservatieve waarden die gebruikt kunnen worden voor grondeigenschappen (parameters). Voor het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen dient normaliter vrijwel altijd gebruik gemaakt te worden van lokaal uitgevoerd (grond)onderzoek.

NEN, EuroCode

De NEN zijn normen die voor Nederland gelden en vallen onder de EuroCode. De meest bekende en vaak gebuikte NEN-normen zijn NEN-EN 1997-1/2 (Geotechnisch ontwerp – Deel 1: Algemene regels, Deel 2: Grondonderzoek en beproeving). Een veel gebruikte parametertabel is tabel 2.b uit NEN-EN 1997-1, zie voor een globaal beeld hiervan Figuur 1. De waarden in deze tabel zijn conservatieve, karakteristieke waarden van het gemiddelde.

Tabel 2.b — Karakteristieke waarden van grondeigenschappen

Grondsoort			Karakteristieke waarde [a] van grondeigenschap											
Hoofd-naam	Bijmengsel	Consis-tentie [b]	γ [c] kN/m³	γ_{sat} kN/m³	q_c [d] [i] MPa	C'_p [e]	C'_s	$C_c/(1+e_0)$ [f] [-]	C_s [f] [-]	$C_{ur}/(1+e_0)$ [f] [-]	E_{ME} [g] [h] MPa	φ' [h] Graden	c' kPa	c_u kPa
Grind	Zwak siltig	Los	17	19	15	500	=	0,004 6	0	0,001 5	45	32,5	0	
		Matig	18	20	25	1 000	=	0,002 3	0	0,000 8	75	35,0	0	N.v.t.
		Vast	19 20	21 22	30	1 200 1 400	=	0,001 9 0,001 6	0	0,000 6 0,000 5	90 105	37,5 40,0	0	
	Sterk siltig	Los	18	20	10	400	=	0,005 8	0	0,001 9	30	30,0	0	
		Matig	19	21	15	600	=	0,003 8	0	0,001 3	45	32,5	0	N.v.t.
		Vast	20 21	22 22,5	25	1 000 1 500	=	0,002 3 0,001 5	0	0,000 8 0,000 5	75 110	35,0 40,0	0	
Zand	Schoon	Los	17	19	5	200	=	0,011 5	0	0,003 8	15	30,0	0	
		Matig	18	20	15	600	=	0,003 8	0	0,001 3	45	32,5	0	N.v.t.
		Vast	19 20	21 22	25	1 000 1 500	=	0,002 3 0,001 5	0	0,000 8 0,000 5	75 110	35,0 40,0	0	
	Zwak siltig, kleiig		18 19	20 21	12	450 650	=	0,005 1 0,003 5	0	0,001 7 0,001 2	35 50	27,0 32,5	0	N.v.t.
	Sterk siltig, kleiig		18 19	20 21	8	200 400	=	0,011 5 0,005 8	0	0,003 8 0,001 9	15 30	25,0 30,0	0	N.v.t.
Leem [a]	Zwak zandig	Slap	19	19	1	25	650	0,092 0	0,003 7	0,030 7	2	27,5 30,0	0	50
		Matig	20	20	2	45	1 300	0,051 1	0,002 0	0,017 0	3	27,5 32,5	1	100
		Vast	21 22	21 22	3	70 100	1 900 2 500	0,032 9 0,023 0	0,001 3 0,000 9	0,011 0 0,007 7	5 7	27,5 35,0	2,5 3,8	200 300
	Sterk zandig		19 20	19 20	2	45 70	1 300 2 000	0,051 1 0,032 9	0,002 0 0,001 3	0,017 0 0,011 0	3 5	27,5 35,0	0 1	50 100
Klei	Schoon	Slap	14	14	0,5	7	80	0,328 6	0,013 1	0,109 5	1	17,5	0	25
		Matig	17	17	1,0	15	160	0,153 3	0,006 1	0,051 1	2	17,5	5	50
		Vast	19 20	19 20	2,0	25 30	320 500	0,092 0 0,076 7	0,003 7 0,003 1	0,030 7 0,025 6	4 10	17,5 25,0	13 15	100 200
	Zwak zandig	Slap	15	15	0,7	10	110	0,230 0	0,009 2	0,076 7	1,5	22,5	0	40
		Matig	18	18	1,5	20	240	0,115 0	0,004 6	0,038 3	3	22,5	5	80
		Vast	20 21	20 21	2,5	30 50	400 600	0,076 7 0,046 0	0,003 1 0,001 8	0,025 6 0,015 3	5 10	22,5 27,5	13 15	120 170
	Sterk zandig	-	18 20	18 20	1,0	25 140	320 1 680	0,092 0 0,016 4	0,003 7 0,000 7	0,030 7 0,005 5	2 5	27,5 32,5	0 1	0 10
	Organisch	Slap	13	13	0,2	7,5	30	0,306 7	0,015 3	0,102 2	0,5	15,0	0 1	10
		Matig	15 16	15 16	0,5	10 15	40 60	0,230 0 0,153 3	0,011 5 0,007 7	0,076 7 0,051 1	1,0 2,0	15,0	0 1	25 30
Veen	Niet voorbelast	Slap	10 12	10 12	0,1	5 7,5	20 30	0,460 0 0,306 7	0,023 0 0,015 3	0,153 3 0,102 2	0,2 0,5	15,0	1 2,5	10 20
	Matig voorbelast	Matig	12 13	12 13	0,2	7,5 10	30 40	0,306 7 0,230 0	0,015 3 0,011 5	0,102 2 0,076 7	0,5 1,0	15,0	2,5 5	20 30
Variatiecoëfficiënt v			0,05		–	0,25					0,10		0,20	

Figuur 1 De veelgebruikte tabel 2.b uit de NEN-EN 1997-1, met karakteristieke waarden van grondeigenschappen.

STOWA

Een aantal waterschappen hebben een database proevenverzameling geïnitieerd, de zogenaamde

STOWA-database. Dit betreft een landelijke database met parameters (voornamelijk sterkteparameters) voor waterkeringen. Deze verder ontwikkelde (en in ontwikkeling zijnde) database is beschikbaar op de Helpdesk Water.

CUR - CROW

De CUR (tegenwoordig SBRCURnet) heeft veel publicaties en aanbevelingen uitgebracht waarin vaak algemene (gebruikelijke) waarden voor bepaalde parameters van grondeigenschappen zijn weergegeven.
Sinds 2018 zijn een aantal projecten en producten van SBRCURnet overgenomen door het CROW. Publicaties worden onder de vlag van CROW-CUR uitgebracht. Hieronder vallen, naast Beton, ook Ondergrond en Geotechniek, Civieltechnische constructies en Waterbouw.

Voorbeelden hiervan zijn:

- CROW-CUR Rapport 162:2022; 'Handboek Construeren met grond' (oorspronkelijk 1992), dat volledig is bijgewerkt.
- CROW-CUR Rapport 166; 'Damwandconstructies (deel 1 en 2)'.

Andere bronnen

Naast de, door bovengenoemde bedrijven en organisaties, uitgebrachte normen en richtlijnen (publicaties) zijn er nog veel meer bronnen, waarin aanwijzingen te vinden zijn voor het gebruik van waarden voor grondeigenschappen. Voor dijkversterking zullen deze veelal niet relevant zijn.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Schematiseren grondeigenschappen

Bij de schematisering van de grondeigenschappen in de ondergrond zijn diverse parameters relevant. De tabel geeft de relevante parameters en de toe te passen waarden weer.

Tabel 1 Toe te passen waarden voor parameters en type waarde te hanteren in semi-probabilistische toets.

Parameter	Toe te passen waarden[1]	Gemiddelde of boven-/ondergrens waarde voor semi probabilistische toets	Relevant mechanisme	Artikel
(On)verzadigd volumiek gewicht γ_{nat}, γ_{dr}	Wordt toegepast als deterministische waarde op basis van lokale gegevens of als scenario op basis van regionale	Gemiddelde waarde of waarde met zowel 5%-ondergrens als 95%-bovengrens met verschoven lognormale	Afschuiven, piping, uitspoelen en bekledingsmechanismen.	Volumiek gewicht

	dataset.	verdeling.		
Cohesie c’	Bij de beoordeling op stabiliteit van de bekleding bij golfoverslag is de stap naar het critical state soil model niet gemaakt.	5%-ondergrens met lognormale verdeling.	Afschuiven langs diep of ondiep glijvlak/afschuiven bekleding.	Karakteristieke schattingen van de schuifsterkte van grond, Regionale proevenverzameling voor bepalen van schuifsterkte en Lokale proevenverzameling voor bepalen van schuifsterkte.
Hoek van inwendige wrijving ϕ’	Wordt toegepast als deterministische waarde op basis van lokale gegevens of als scenario op basis van regionale dataset.	5%-ondergrens met log normale verdeling.	Afschuiven.	Karakteristieke schattingen van de schuifsterkte van grond, Regionale proevenverzameling voor bepalen van schuifsterkte en Lokale proevenverzameling voor bepalen van schuifsterkte.
Normaal geconsolideerde ongedraineerde schuifsterkte ratio S	Wordt toegepast als deterministische waarde op basis van lokale gegevens of als scenario op basis van regionale dataset.	5%-ondergrens met lognormale verdeling.	Afschuiven langs een diep glijvlak.	Karakteristieke schattingen van de schuifsterkte van grond, Regionale proevenverzameling voor bepalen van schuifsterkte en Lokale proevenverzameling voor bepalen van schuifsterkte.

Sterktetoename-exponent m	Verwachtingswaarde 0,9 met variatiecoëfficiënt 0,03.	5%-ondergrens met lognormale verdeling.	Afschuiven langs een diep glijvlak.	Karakteristieke schattingen van de schuifsterkte van grond, Regionale proevenverzameling voor bepalen van schuifsterkte en Lokale proevenverzameling voor bepalen van schuifsterkte.
Grensspanning σ'_{vy} / Pre Overburden Pressure POP	Wordt berekend en is afhankelijk van de lokale effectieve spanning en POP. De default variatiecoëfficiënt POP en grensspanning is voor Hollandveen en dijksmateriaal 0,45 en voor overige grondsoorten 0,30.	5%-ondergrens met lognormale verdeling, in veel gevallen is deze eigenschap locatie specifiek.	Afschuiven langs een diep glijvlak.	Karakteristieke schattingen van de schuifsterkte van grond, Regionale proevenverzameling voor bepalen van schuifsterkte en Lokale proevenverzameling voor bepalen van schuifsterkte.
d_{70}	De d_{70} kan worden bepaald op basis van defaultwaarden of lokaal onderzoek.	5%-ondergrens met lognormale verdeling.	Piping	
Doorlatendheid	De doorlatendheid van het watervoerend pakket kan worden bepaald aan de hand van defaultwaarden, lokaal onderzoek of correlaties met korrelverdelingen.	95%-ondergrens met lognormale verdeling.	Piping, uitspoelen en bekledingsmechanismen.	

Stijfheid en vervormings-parameters / Samendrukkings constanten	Voor stijfheid en vervormingspara meters worden meestal de gemiddelde waardes genomen.	Hoogte	Samendrukbaarheid, Dilatantie,

[1] Met deze waarden kan verantwoord het initieel mechanisme afschuiven langs een diep glijvlak worden uitgevoerd. Wanneer de beheerder de beschikking heeft over aantoonbaar betere waarden kan hij deze gebruiken.

Versie 1.0: 2 juli 2025

5. Gebruik van gegevensbronnen

Gebruik van gegevensbronnen (BRO en kaarten) voor grondlaageigenschappen

Gebruik van registratie-objecten uit de Basisregistratie Ondergrond (BRO) voor laageigenschappen

In het artikel Gebruik van registratie-objecten uit de BRO voor de grondopbouw staat algemene informatie over de beschikbare data uit de Basisregistratie Ondergrond.

In de BRO zijn peilbuismetingen beschikbaar. Deze metingen kunnen informatie geven over de te hanteren stijghoogten en grondwaterstanden, maar kunnen ook gebruikt worden voor validatie van project specifiek ingewonnen gegevens. Een relatief korte meetreeks kan door een vergelijking met een langdurige meetreeks uit de BRO beter op waarde worden geschat. Voor meer informatie over de interpretatie van peilbuismetingen wordt verwezen naar de artikelen Analytische modellen voor de interpretatie van peilbuiswaarnemingen en Valkuilen bij interpreteren van waterspanningsmetingen.

Naast peilbuismetingen is er in de BRO ook een geohydrologisch model (REGIS II) beschikbaar dat geraadpleegd kan worden voor informatie over de laageigenschappen.

REGIS II is een 3D-lagenmodel dat de ondergrond van Nederland tot ongeveer 500 meter onder NAP in blokken van 100 bij 100 meter weergeeft. Er zijn ook uitschieters in REGIS II tot circa 1.200 meter onder NAP. Het model geeft goed en slecht doorlatende lagen in de ondergrond weer. Deze lagen worden hydrogeologische eenheden genoemd en hebben min of meer uniforme hydraulische eigenschappen. Online is meer informatie te vinden en zijn de indicatieve waarden van de geohydrologische laageigenschappen (zoals doorlatendheid) te raadplegen. Zie REGIS II, hydrogeologisch model (HGM) - Basisregistratieondergrond.

Naast het REGIS II model is ook het BRO GeoTOP model beschikbaar. Dit model is gebaseerd op sondeer- en boordata en geeft een driedimensionaal beeld van de (ondiepere) ondergrond van Nederland tot een diepte van maximaal 50 meter onder NAP. In BRO GeoTOP wordt de ondergrond onderverdeeld in miljoenen cellen van 100 bij 100 meter in het horizontale vlak en 50 centimeter verticaal. In dit model zijn eigenschappen gekoppeld aan de lagen. Zie BRO GeoTOP: detaillering van de bovenste lagen | BROloket.

Gebruik van geohydrologische informatie, zoals kaarten

Er zijn tools beschikbaar die de grondwaterstanden in beeld brengen op basis van openbare data zoals BRP peilbuismetingen en het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) en de zandbanenkaart. Op de pagina Grondwaterstanden in beeld van de website grondwatertools.nl kunnen kaarten worden samengesteld, zoals isohypsen kaarten. Daarnaast biedt het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium op zijn website nhi.nu data aan met betrekking tot grond- en oppervlaktewater(modellen) .

Versie 1.0: 2 juli 2025

Gebruik van registratie-objecten uit de BRO en NHI voor grondwaterdata

BRO

De Basisregistratie Ondergrond (BRO) vormt het fundament voor beheer en beleid van de ondergrond in Nederland. De BRO bestaat uit meerdere registratieobjecten waar eenduidige, betrouwbare data en informatie over de ondergrond van Nederland gevonden en aangeleverd kan worden.

De Wet basisregistratie ondergrond (Wet Bro) is op 1 januari 2018 in werking getreden. Er is gekozen voor een gefaseerde invoering, waarbij in vier verschillende tranches in totaal 25 registratieobjecten moeten worden opgenomen in de BRO. Voor de registratieobjecten uit tranche 1 (geotechnisch sondeeronderzoeken, bodemkundige boormonsterbeschrijvingen en de grondwatermonitoringputten) geldt sinds 1 januari 2018 een wettelijke verplichting.

Een aanzienlijk deel van grondwaterdata en grondgegevens is nu nog opgenomen in de DINO-database van TNO (Data en Informatie van de Nederlandse ondergrond): het DINOloket. Op termijn worden deze gegevens toegevoegd aan de BRO. Dit betreft hoofdzakelijk:

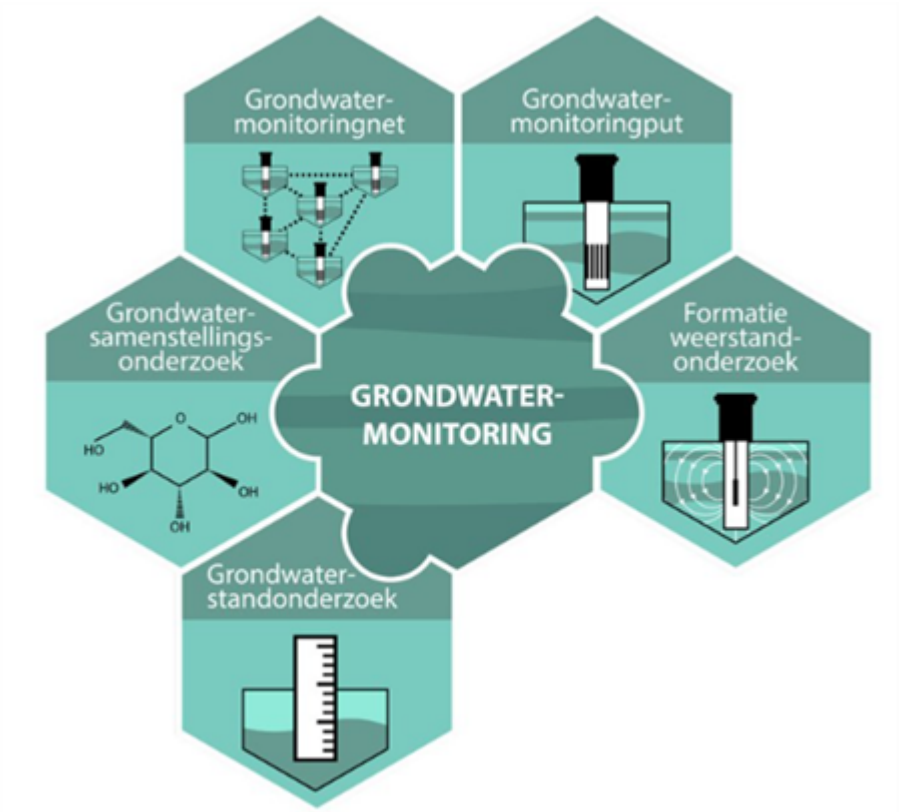
1. Ondergrondgegevens: Bodem- en grondonderzoek, Grondwatermonitoring en Overige.

2. Ondergrondmodellen: BRO DGM v2.2, BRO REGIS II v2.2, BRO GeoTOP v1.4.1, BRO Geomorfologie 2019, BRO Bodemkaart 2021, BRO Grondwaterspiegeldiepte 2021, Geologische kaart 2021 en DGMdiep v5.0.

Informatie over grondwaterspanningen valt binnen de BRO onder het domein ‘Grondwatermonitoring’, waaronder vijf registratieobjecten vallen (zie onderstaande figuur):

- Grondwatermonitoringnet
- Grondwatermonitoringput
- Grondwaterstandonderzoeken
- Grondwatersamenstellingsonderzoek
- Formatieweerstandonderzoek

Het gaat in het algemeen om grondwaterputten (peilbuizen) die zijn ingericht om de kwaliteit en de kwantiteit van het grondwater over langere tijd te kunnen monitoren. Tijdelijke bewakingsmeetnetten rond bijvoorbeeld saneringslocaties of stortplaatsen vallen buiten het domein.



Figuur 1 Domein van grondwatermonitoring [website BRO].

Gegevens die gebruikt worden uit de BRO dienen in principe altijd getoetst te worden aan lokaal beschikbare gegevens en/of metingen.

NHI

Naast de BRO is er ook het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI). Dit is een data-portaal, waar een verzameling software en data voor het ontwikkelen van grondwater- en oppervlaktewatermodellen wordt verzameld en vastgelegd. Dit gebeurt voor Nederland op landelijke en regionale schaal en is bedoeld om de kennis van specialisten, instituten en adviesbureaus te bundelen. Binnen het NHI wordt toegewerkt naar open data en software en is een begin gemaakt met de ontsluiting van data, welke kan worden bekeken en gedownload. Kijk voor meer informatie op NHI.nu.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Gebruik van registratie-objecten uit de Basisregistratie Grootschalige Topografie (BGT) voor verkeersbelasting

De Basisregistratie Grootschalige Topografie (BGT) is een digitale kaart van Nederland waarop alle fysieke objecten zoals gebouwen, wegen, water en groen eenduidig zijn vastgelegd. De kaart is op 20 centimeter nauwkeurig en bevat veel details die in de werkelijkheid ook te zien zijn. De kaart geeft dus een goed beeld van de inrichting van de fysieke omgeving.

De gegevens kunnen worden gebruikt om te bepalen, of een indicatie te krijgen, waar rekening gehouden moet worden met verkeersbelasting en hoe groot deze dan zou kunnen zijn. Zo kan er onderscheid worden gemaakt tussen verschillende typen wegen met mogelijk verschillende verkeersklassen.

Ten behoeve van het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen zijn er specifieke richtlijnen, die aangeven hoe groot en op welke wijze een verkeersbelasting op een waterkering in rekening gebracht dient te worden.

Versie 1.0: 2 juli 2025

Literatuurverwijzingen

D-Soil Model : Ondergrondschematiseringsproces voor geotechnische toepassingen : Gebruikershandleiding ; Wettelijk Toets Instrumentarium 2017. Deltares, september 2017.

Leidraad zee- en meerdijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), december 1999.

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

The International Levee Handbook. CIRIA, 2013.

_____

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

_____

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

_____

Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen : Module C Sterkte ; Update 2018. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), publicatienummer 2015-15, juli 2018.

Van der Meer, M.T., J. Niemeijer, W.J. Post en J. Heemstra. *Technisch rapport waterspanningen bij dijken*. Rijkswaterstaat (RWS DWW) en Technische Adviescommissie voor de waterkeringen (TAW), rapport DWW-2004-057, september 2004.

_____

Handleiding DAM Edit Design. Deltares, 2012.

_____

Handleiding overstromingskansanalyse dijken/dammen : Deel 1 Geotechnische instabiliteit. Rijkswaterstaat.

Handleiding overstromingskansanalyse dijken/dammen: Deel 2 Piping. Rijkswaterstaat.

Handleiding overstromingskansanalyse dijken/dammen : Deel 3 Dijkerosie - buitentalud. Rijkswaterstaat.

Handleiding overstromingskansanalyse dijken/dammen : Deel 4 Dijkerosie - kruin en binnentalud. Rijkswaterstaat.

_____

Senhorst, H. Vier quick wins grond en klei : Optimalisaties voor dijkversterkingen. Rijkswaterstaat en Hoogwaterbeschermingsprogramma-2 (HWBP), april 2018.

Technisch rapport klei voor dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), mei 1996.

Van Meurs, G.A.M. en G.A.M. Kruse. Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking : Aanbevelingen voor ontwerp en uitvoering. Deltares, rapport 1220633-000-GEO-0012-v2, januari 2017.

Technisch rapport grondmechanisch schematiseren bij dijken. Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW), oktober 2012.

Erkens, G. et al. Dijken op Veen II. Deltares, rapport 1208254-013-GEO- 0001, 2013.

Geologie van Nederland

NEN-EN-ISO 14688-1:2019+NEN 8990:2020. *Geotechnisch onderzoek en beproeving - Identificatie en classificatie van grond - Deel 1: Identificatie en beschrijving*. NEN, juli 2020.

Richtlijn herstel en beheer (water)bodemkwaliteit

Van der Meulen, M.J., F.D. de Lang, D. Maljers, C.W. Dubelaar en W.E. Westerhoff.*Grondsoorten en delfstoffen bij naam : Woordenboek van Nederlandse grondsoorten en gesteenten, en daarvan vervaardigde grondstoffen ; 2e licht gew. dr*. Rijkswaterstaat (RWS DWW) en Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (TNO ITG), rapport DWW-2003-093, januari 2003.

Geologie van Nederland

NEN-EN-ISO 14688-1:2019+NEN 8990:2020. *Geotechnisch onderzoek en beproeving - Identificatie en classificatie van grond - Deel 1: Identificatie en beschrijving*. NEN, juli 2020.

Richtlijn herstel en beheer (water)bodemkwaliteit

Van der Meulen, M.J., F.D. de Lang, D. Maljers, C.W. Dubelaar en W.E. Westerhoff.*Grondsoorten en delfstoffen bij naam : Woordenboek van Nederlandse grondsoorten en gesteenten, en daarvan vervaardigde grondstoffen ; 2e licht gew. dr*. Rijkswaterstaat (RWS DWW) en Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (TNO ITG), rapport DWW-2003-093, januari 2003.

Cases aard en omvang terrein- en laboratoriumonderzoek. CUR, rapport C68. Gouda, 1991.

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

Literatuurlijst

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden

TR-15 (wur.nl), Technisch Rapport TAW, Zandmeevoerende Wellen

---

Literatuur

Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond, DINO. TNO, Geologische Dienst Nederland.

Basisregistratie Ondergrond, BRO. Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties.

Halter, W., I. Groenouwe, M. Tonneijck en K. D'Angremond. *Handboek Dijkenbouw; Uitvoering versterking en nieuwbouw*. Rijkswaterstaat, Hoogwaterbeschermingsprogramma, Dijkwerkers. Utrecht, september 2018.

Literatuur

Calle, E.O.F. en M.T. van der Meer. *Probabilisme in de Geotechniek* (Studie i.o.v. Rijkswaterstaat DWW met diverse rapportages van GeoDelft en Fugro - Onderdeel Ruimtelijke variabiliteit, Fase AIII) Grondmechanica Delft, rapport CO-361410/95, Delft, december 1997.

Calle, E.O.F. *Optimalisatie Grondonderzoek vraagt heldere Kansenanalyse*. Artikel in Tijdschrift Land en Water, nr. 42, pagina 36, 37 en 39. BDUvakmedia, Barneveld, november 2002.

Koelewijn, A.R.. *The practical values of slope stability models,* Learned and Applied, Soil Mechanics out of Delft (Eds. Barends & Steijger), A.A. Balkema Publishers, ISBN 90 5808 357 3, Rotterdam, 2002.

Vrouwenvelder, A.C.W.M. en E.O.F. Calle. Measuring Spatial Correlation of Soil Properties. Delft Heron, no 4, jaargang 2003, Uitgave TNO-Bouw en TU-Delft, 2003.

Kroon, Inger B. en Marc A. Maes, *Framework for Risk Assessment and Evaluation. Discussion paper submitted to the Joint Committee on Structural Safety*. (meeting Madrid 2004, 2nd draft March 2004). Maart 2004.

Stoop, J.D. et al. *Technisch Rapport Actuele sterkte van dijken*. Expertise Netwerk Waterveiligheid, ENW. Delft, maart 2009.

Literatuur

Hijma, M.P. en K.S. Lam *Globale stochastische ondergrondschematisatie (WTI-SOS) voor de primaire waterkeringen*Deltares rapport 1209432-000-GEO-0006. Delft, september 2015.

Kruse, G.A.M. en M.P. Hijma *Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS* Deltares rapport 1209432-004-GEO-0002, Delft, december 2015.

Literatuur

Kruse, G. en M.P. Hijma *Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS*. Deltares rapport 1209432-004-GEO-0002. Delft, december 2015.

Basisregistratie Ondergrond: BRO. Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. https://basisregistratieondergrond.nl/.

Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond, DINO. TNO, www.dinoloket.nl.

Calle, E.O.F. *Optimalisatie Grondonderzoek vraagt heldere Kansenanalyse*. Artikel in Tijdschrift Land en Water, nr. 42, pagina 36, 37 en 39. BDUvakmedia, Barneveld, november 2002.

Calle, E.OF. *Grondmechanisch schematiseren bij dijken*. Deltares, rapport 1001411-010-GEO-0008, oktober 2012.

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

Robertson, P.K. *Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system : An update*. Canadian Geotechnical Journal 53(12) 1910-1927, December 2016.

_____

Digispectie handleiding : installatie en gebruik DigiSpectie. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), rapport 2007-08, januari 2007.

Zuada Coelho, B., G. Diaferia, P. Kruiver en A. Venmans. *Geofysische methoden voor geotechnische ingenieurs*. Geo-Impuls, Deltares, rapport 1202416-008-GEO-0006, april 2015.

_____

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

_____

Basisregistratie Ondergrond.

Ook BRO-data via DINOloket.

_____

Geologie van Nederland.

DINOloket.

Basisregistratie Ondergrond.

Bodem- Zandbanen en Zanddieptekaart 2010 provincie Gelderland.

_____

Technisch rapport grondmechanisch schematiseren bij dijken. Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW), oktober 2012.

_____

Handreiking meten en monitoren aan waterkeringen : Inzet en kwaliteit monitoringssystemen. Deltares en Rijkswaterstaat (RWS WVL), 2016.

_____

Calle, E.OF. *Grondmechanisch schematiseren bij dijken : Concept Technisch rapport*. Deltares, rapport 1001411-010-GEO-0008, oktober 2012.

Digispectie handleiding : installatie en gebruik DigiSpectie. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), rapport 2007-08, januari 2007.

Handreiking meten en monitoren aan waterkeringen : Inzet en kwaliteit monitoringssystemen. Deltares-RWS-WVL, 2016.

Robertson, P.K. *Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system : an update*. Canadian Geotechnical Journal 53(12) 1910-1927, december 2016.

Technisch *rapport waterkerende grondconstructies : geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden.* Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

Zuada Coelho, B., G. Diaferia, P. Kruiver en A. Venmans. *Geofysische methoden voor geotechnische ingenieurs*. Geo-Impuls, Deltares, rapport 1202416-008-GEO-0006, april 2015.

Richtlijn herstel en beheer (water)bodemkwaliteit.

_____

Den Adel, H. en M.A. Van. *Uitwerking Ko-CRS-proef, bepaling abc-parameters ; Versie 2 definitief*. Delft Cluster, rapport 58, maart 2002.

Förster, U., G. van den Ham, E. Calle en G. Kruse. *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*. Deltares, rapport 1202123-003-GEO-0002, maart 2012.

_____

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

_____

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

_____

NEN-EN 1997-1+C1+A1:2016/NB:2019. NEN, 1 juli 2019. Karakteristieke waarden voor het bepalen van grondeigenschappen, tabel 2.b.

_____

Technisch rapport geotechnische classificatie van veen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 1996.

_____

Backhausen, U. en A.E.C. van der Stoel (eindred.). *Reader geotechniek voor het HBO*. KIVI, juli 2014.

NEN-EN-14688-1+2 (classificatie). Norm, juli 2020.

NEN-EN-933-1 (korrelgrootteverdeling – zeefmethode). Norm, juli 2021.

Van Deen, J.K. *Sedimentatiemethoden voor de fijne fractie van de korrelverdeling*. Geotechniek 4(3), 6-10, 2000.

_____

Backhausen, U. en A.E.C. van der Stoel (eindred.). *Reader geotechniek voor het HBO*. KIVI, juli 2014.

NEN-EN-14688-1+2 (classificatie). Juli 2020.

_____

Literatuur

Greeuw, G., Essen, H.M. van en Duinen, T.A. van. *Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen*. Deltares rapport 1230090-019-GEO-0002, Versie 03: definitief. Delft, 25 mei 2016.

_____

Halter, W., I. Groenouwe, M. Tonneijck en K. D'Angremond. *Handboek dijkenbouw : Uitvoering versterking en nieuwbouw*. Hoogwaterbeschermingsprogramma, 2018.

Senhorst, H. *Vier quick wins grond en klei : Optimalisaties voor dijkversterkingen*. Rijkswaterstaat en Hoogwaterbeschermingsprogramma-2 (HWBP), april 2018.

Technisch kader toepassing gebiedseigen grond : Van richtlijngestuurd naar grondgestuurd ontwerpen. Projectoverstijgende verkenning gebiedseigen grond, oktober 2022.

Van Meurs, G.A.M. en G.A.M. Kruse. *Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking : Aanbevelingen voor ontwerp en uitvoering*. Deltares, rapport 1220633-000-GEO-0012-v2,

januari 2017.

Halter, W., I. Groenouwe, M. Tonneijck en K. D'Angremond. *Handboek dijkenbouw : Uitvoering versterking en nieuwbouw*. Hoogwaterbeschermingsprogramma, 2018.

NEN-EN-14688-1+2 (classificatie). Norm, juli 2020.

Senhorst, H. *Vier quick wins grond en klei : Optimalisaties voor dijkversterkingen*. Rijkswaterstaat en Hoogwaterbeschermingsprogramma-2 (HWBP), april 2018.

Standaard RAW Bepalingen 2020. CROW, mei 2020.

Technisch rapport klei voor dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), mei 1996.

Van Duinen, T.A. *Handreiking voor het bepalen van schuifsterkte parameters : WTI 2017 Toetsregels Stabiliteit*. Deltares, rapport 1209434-003-GEO-0002, december 2014.

NEN-EN 1997-1+C1+A1:2016/NB:2019. NEN, 1 juli 2019. Karakteristieke waarden voor het bepalen van grondeigenschappen, tabel 2.b.

Technisch rapport waterkerende grondconstructies : Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), juni 2001.

Standaard RAW Bepalingen 2020. CROW, mei 2020.

NEN. *NEN-EN 1997-1/2(Geotechnisch ontwerp – Deel 1: Algemene regels, Deel2: Grondonderzoek en beproeving)*. Norm, augustus 2007.

Calle, E.OF. *Grondmechanisch schematiseren bij dijken*. Deltares, rapport 1001411-010-GEO-0008, oktober 2012.

Kruse, G.A.M. en M.P. Hijma. WTI 2017 : Handleiding lokaal schematiseren met WTI-SOS. Deltares, rapport 1209432-004-GEO-0002, december 2015.

Technisch rapport Grondmechanisch schematiseren bij dijken. Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW), oktober 2012.

Basisregistratie Ondergrond: *De registratieobjecten*.

DINOloket.

Nederlands Hydrologisch Instrumentarium.

Basisregistratie Grootschalige Topografie.
