

Handboek geotechnisch bodemonderzoek

onder grond

ondergrond



Juni 2006

De Vereniging Ondernemers Technisch Bodemonderzoek, VOTB, en degenen die aan dit boek hebben meegewerkt, hebben de hierin opgenomen gegevens zorgvuldig verzameld naar de laatste stand van de wetenschap en de techniek. Desondanks kunnen in dit boek onjuistheden voorkomen. Gebruikers aanvaarden het risico daarvan.

De VOTB sluit, mede ten behoeve van degenen die aan dit boek hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor de schade die voortvloeit uit het gebruik van de gegevens.

De inhoud van deze uitgave valt onder bescherming van de auteurswet. De auteursrechten berusten bij de VOTB.

Colofon

Ondergrond

Handboek geotechnisch bodemonderzoek

Uitgave: VOTB, Voorschoten

ISBN-10: 90-810737-1-0

ISBN-13: 97890-810737-1-4

NUR-code: 170, technische vakken algemeen

Eindredactie: Carola Schoor, Jan van der Sluis

Fotografie: De foto's zijn gemaakt of beschikbaar gesteld door:

ANP, ENCI, Fugro Ingenieursbureau, GeoDelft, Geomil, Gemeente Amsterdam, GW Rotterdam, Lankelma Geotechniek Zuid, Mos Grondmechanica, Mos Grondwatertechniek, De Ruiter Boringen en Bemalingen, Wiertsema & Partners, Daan Eijmaal, prof.ir. A.F. van Weele, CS Lelystad Wageningen UR.

De uitgever heeft ernaar gestreefd de rechten van de foto's en illustraties volgens de wettelijke bepalingen te regelen. Zij die menen nog zekere rechten te kunnen doen gelden, kunnen zich tot de uitgever wenden.

Vormgeving: Studio Yellow, Amsterdam

Druk: Drukkerij Rijser, Purmerend

Dit boek is te bestellen bij het secretariaat van de VOTB:

Meerkoeteiland 20, 2251 WV Voorschoten

tel.: 06 - 25 08 72 50

e-mail: info@votb.nl, website: www.votb.nl

ondergrond

VOORWOORD

Dit boek wordt u aangeboden door de Vereniging Ondernemers Technisch Bodemonderzoek (VOTB).

In het boek wordt op een heldere manier uiteengezet wat onder technisch bodemonderzoek wordt verstaan en waarom het zo belangrijk is eerst alle eigenschappen van de grond te kennen, voordat met het ontwerpen en het bouwen van een constructie wordt begonnen. Bodemonderzoek, maar vooral het vertalen van de verkregen gegevens naar een gedegen geotechnisch advies is werk voor deskundigen.

De VOTB is in 1977 opgericht als brancheorganisatie van bedrijven met werkzaamheden op het gebied van de geotechniek, waarbij het technisch bodemonderzoek centraal staat.

De 27 leden van de VOTB, zijn bedrijven, die werkzaamheden uitvoeren op het gebied van bodemonderzoek, eventueel aangevuld met laboratoriumonderzoek, funderingscontrole, bouwbegeleiding, monitoring en advisering. De VOTB zet zich in voor het gemeenschappelijke belang van de leden en promoot vooral het belang van goed bodemonderzoek, waarvan de uitgave van dit boek een voorbeeld is. Daarnaast wordt binnen de vereniging goede samenwerking gestimuleerd en onderling wordt veel kennis en ervaring uitgewisseld.

Het bestuur van de VOTB bedankt de auteurs en de leden van redactiecommissie voor hun bijdragen aan de totstandkoming van dit boek. Dit zijn met name de heren drs.ir. M.W. Bielefeld, ing. H.C. van de Graaf, drs. D.J.P. Kunst, ing. W.A. Nohl, ing. J. van der Sluis, ir. M.Th. van Staveren MBA, ing. G.T. Visser en ing. J.P. Wiertsema. Zonder hun enthousiasme en inspanningen zou dit boek nooit tot stand zijn gekomen.

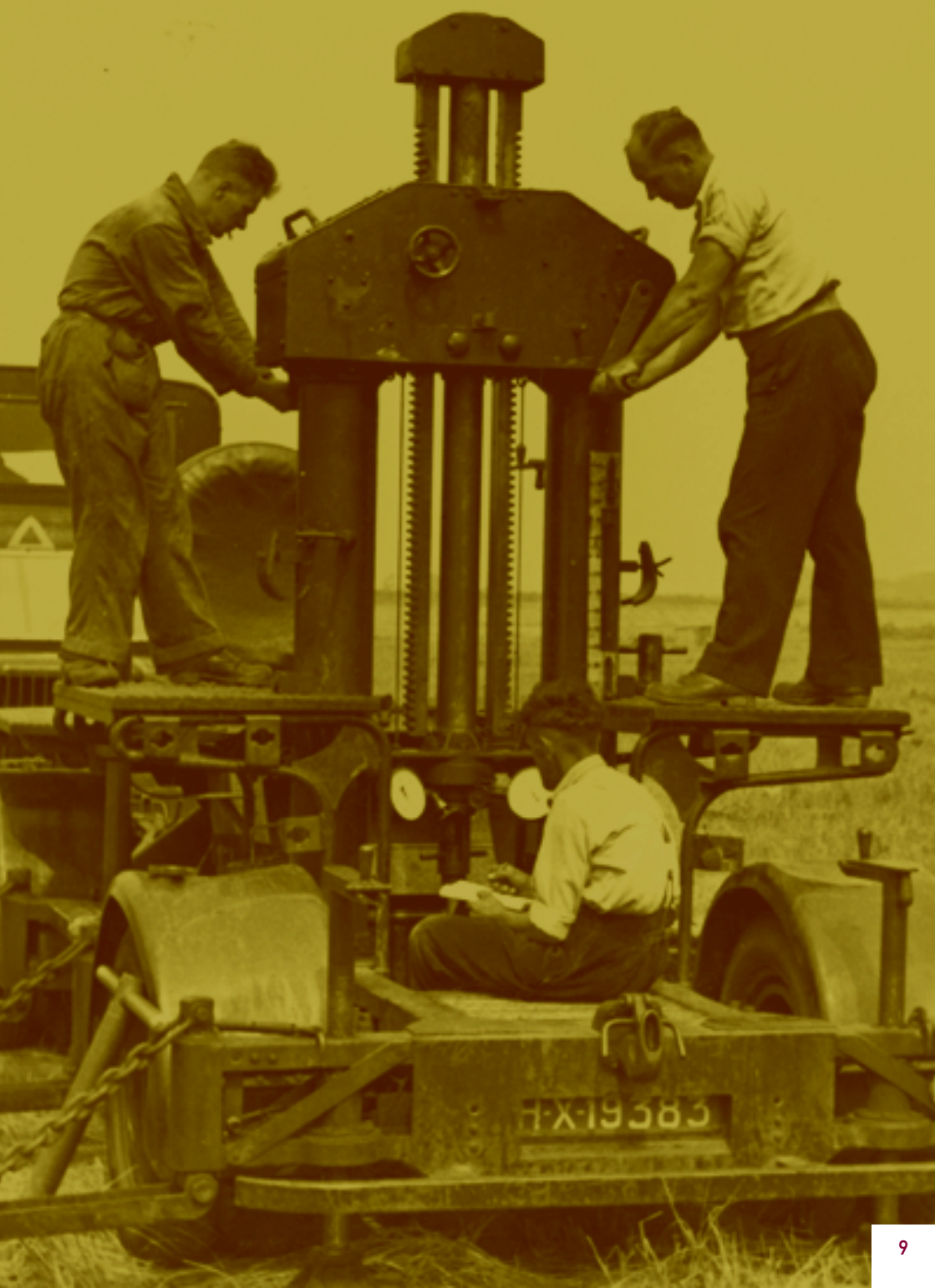
Wij denken dat dit boek voor velen een interessant en nuttig naslagwerk zal zijn en verwachten dat het zeker zal bijdragen aan een beter begrip van het technisch bodemonderzoek in Nederland.

ir. P. van Goudoever, voorzitter VOTB

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	11
2	DE BODEM VAN NEDERLAND <i>Geologische geschiedenis, Afzettingspakketten, Draagkracht, Grondsoorten, Raadselachtige schade</i>	15
3	PRAKTIJK VAN HET BOUWEN <i>Vooronderzoeken, Checklist, Klicken, Inlichtingen inwinnen, Kostenpost</i>	27
4	TERREINONDERZOEK: SONDEREN <i>Geschiedenis van het sonderen, Op en onder water, Hedendaagse praktijk, Meten is weten, Materieel, Bodemonderzoek? Dat doe je toch pas als er iets mis is gegaan</i>	39
5	TERREINONDERZOEK: BOREN <i>Geschiedenis van het boren, Hedendaagse praktijk, Uitgelegde boring, Materieel</i>	57
6	OVERIG TERREINONDERZOEK <i>Het bepalen van de grondwaterstand, Slagsondering, Standard Penetration Test (SPT), Monitoring</i>	67
7	OPZET VAN EEN BODEMONDERZOEK <i>Onderzoek voor een funderingsadvies, Onderzoek voor grotere bouwwerken, Onderzoeksplan</i>	73
8	GRONDMECHANICA <i>Grondspanningen, Een berekening, Voorschriften, Zettingen, Funderingen op staal, Paalfunderingen, Grondkerende constructies, Grondwater</i>	77

9	LABORATORIUMONDERZOEK	95
	<i>Monsters nemen, Laboratoriumproeven, De meest uitgevoerde laboratoriumproeven, Plasticiteitsindex, Waterdoorlatendheid</i>	
10	UITVOERINGSNORMEN	111
	<i>Sonderen, Veiligheid en kwaliteit, Veiligheids Checklijst Aannemers VCA, Boren, Laboratoriumonderzoek, Het optimale onderzoek, Geen stuit</i>	
11	RISICO'S VERMINDEREN MET BODEMONDERZOEK	121
	<i>Wat is risicomanagement?, De waarde van risicomanagement, Richtlijnen, Stappenplan, Eenvoudig geotechnisch risicomanagement, Statistiek en waarschijnlijkheidsleer, Rijker door rekenen</i>	
	WOORDENLIJST	135
	LEDENLIJST VOTB	141



1 INLEIDING

Grond is overal en wordt op talloze manieren gebuikt. We wonen, werken en recreëren erop, maar ook ons voedsel wordt erop verbouwd. De borden waarvan we eten, de stenen voor onze huizen; ze zijn allemaal van (klei)grond gemaakt.

Alle bouwkundige en civieltechnische werken hebben op een of andere manier met grond te maken. Toch is er in natuurkundig en mechanisch opzicht maar weinig over grond bekend. Ook de gebruikte termen voor veel voorkomende funderingstechnieken en methoden geven nogal eens aanleiding tot misverstanden. Zo heeft een ‘fundering op staal’ niets met het materiaal ijzer te maken, maar alles met het feit dat een draagmuur op een plaat of poer is geplaatst. ‘Staal’ verwijst waarschijnlijk naar een laag rijshout die vroeger ter versteviging onder dijken werd aangebracht. Een ‘fundering op koeienhuiden’ heeft ook niets met het boerenbedrijf te maken. Het is een oude funderingsmethode, waarbij een ton zonder bodem gevuld met rijshouttakken op de grond werd geplaatst. Vervolgens werden de takken met een handheide grond ingeslagen, waarbij ze alle kanten op gingen staan en zo voor een goede spreiding van funderingslasten konden zorgen.

Grond is op verschillende plaatsen en op verschillende tijden gevormd en kan dus van plaats tot plaats heel erg verschillen. Het is met andere woorden een heterogeen materiaal. Dit maakt berekeningen voor bijvoorbeeld de draagkracht voor funderingen of de grootte van grondbelastingen, gecompliceerd. Om toch verantwoord te bouwen is het noodzakelijk om van tevoren de grondopbouw te kennen en daarmee onaangename verrassingen tijdens of na de bouw te voorkomen. Ook moet worden vermeden dat er door bouwactiviteiten schade ontstaat aan de omgeving, zoals verzakking van aangrenzende gebouwen door graafwerkzaamheden, het verlagen van de grondwaterstand, heitrillingen, enzovoort.

Schade aan bestaande bebouwing en beplanting gaat meestal gepaard met fikse schadeclaims. Vaak is dergelijke schade moeilijk te verzekeren, omdat aangetoond moet worden dat alles is gedaan om de schade te voorkomen. Dit leidt tot lange rechtsprocedures en hoge proceskosten. Door een degelijk bodemonderzoek uit te voeren en de juiste uitvoeringsmethode te kiezen, kan veel risico worden vermeden. Het vastleggen van de bouwkundige staat van aangrenzende bouwwerken en een

historisch onderzoek (archief) kan een goed hulpmiddel zijn om onterechte claims te weerleggen.

Dit boek geeft in vogelvlucht weer hoe de grond in Nederland is opgebouwd, welke bodemonderzoeken nodig zijn voor het realiseren van bouwplannen, en wat daarbij allemaal komt kijken. Hoewel de uitvoering dikwijls gecompliceerd is, kan het veel ellende tijdens en na het bouwen voorkomen. De kosten worden vaak ruimschoots terugverdiend.



2 DE BODEM VAN NEDERLAND

Nederland is een lage en natte rivierdelta aan de Noordzee. Dit heeft de bodem van ons land sterk bepaald. Zo zijn verschillende soorten grond en steen afgezet (sediment), bijvoorbeeld door rivieren als de Rijn en de Maas, de Noordzee, de wind of plantengroei in drassige (moeras)gebieden, en zelfs ten gevolge van de landijsbedekking tijdens de ijstijden. Dit gebeurde geologisch gezien niet zo lang geleden, namelijk in de periode van het Kwartair, die ongeveer 1,8 miljoen jaar geleden begon. Een overzicht van de geologische tijdvakken is weergegeven in figuur 2.1.

Geologische geschiedenis

In de lange periode die aan het Kwartair voorafging waren de omstandigheden in Nederland vaak heel verschillend. Dan weer lag Nederland onder water, dan was het weer land, dan weer iets er tussenin. Ook de klimatologische omstandigheden varieerden sterk: van ijstijden en tropische koraalzeeën tot zoute binnenzeeën die in een woestijnhitte droog dampten.

Al deze wisselende omstandigheden hebben in de geologische geschiedenis van Nederland diverse soorten gesteente gevormd. Deze liggen nu begraven onder het dikke pakket van relatief jonge sedimenten, dat nu de bodem van Nederland vormt.

• Koraalrif

De oudste (bekende) gesteenten van de Nederlandse bodem werden 416 tot 354 miljoen jaar geleden gevormd. In deze periode, ook wel het Devoon genoemd, werd Nederland geleidelijk overspoeld door de zee. In deze zee zetten zich klei- en zandlagen af. Ook zorgde de ontwikkeling van koraalriffen in de ondiepere delen van de zee voor de vorming van kalksteenlagen. Aan het einde van het Devoon zakt de zeespiegel en steekt Nederland hier en daar weer boven water uit. In het noordelijke deel van de Noordzee treedt vulkanisme op. Nergens in Nederland zijn gesteenten van Devonische ouderdom aan de oppervlakte zichtbaar, de gesteenten zijn uitsluitend bekend geworden uit diepe boringen naar olie en aardgas.

Era	Periode	Tijdvak	Ouderdom (Ma)	
Kenozoïcum	Kwartair	Holoceen		
		Pleistoceen	1.8	
	Tertiair	Neogeen	Pliocéen	
			Mioceen	
		Paleogeen	Oligoceen	
			Eoceen	
			Paleoceen	65
Mesozoïcum	Krijt	Boven Krijt		
		Onder Krijt	142	
	Jura	Boven Jura (Malm)		
		Midden Jura (Dogger)		
		Onder Jura (Lias)	205	
	Trias	Boven Trias (Keuper)		
		Midden Trias (Muschelkalk)		
		Onder Trias (Buntsandstein)	248	
Paleozoïcum	Perm	Boven Perm (Zechstein)		
		Onder Perm (Rotliegend)	290	
	Carboon	Boven Carboon (Pennsylvanian)		
		Onder Carboon (Mississippian)	354	
	Devoon	Boven Devoon		
		Midden Devoon		
		Onder Devoon	416	
	Siluur	Boven Siluur		
		Onder Siluur	443	
	Ordovicium	Boven Ordovicium		
		Midden Ordovicium		
		Onder Ordovicium	495	
	Cambrium	Boven Cambrium		
		Midden Cambrium		
		Onder Cambrium	545	
Precambrium			4600	

Figuur 2.1

• Tropisch warm

In de volgende periode, het Carboon (354 – 290 miljoen jaar geleden), treffen we in Nederland een ondiepe zee aan die zorgt voor de vorming van kalksteen. Ook zijn er rivierdelta's met kustmoerassen waarin zand- en kleisteenlagen met afwisselend steenkoollagen worden gevormd. In het Carboon was het in ons land tropisch warm en vochtig, waardoor een weelderige vegetatie kon groeien met reusachtige varens en schubbomen. In deze situatie werd een enorm dik pakket veen gevormd. Later is dit onder invloed van druk en temperatuur in de diepte omgezet in steenkool. Bij elkaar opgeteld is hiervan een pakket van circa honderd meter dikte gevormd. In Zuid-Limburg is deze steenkool nog tot relatief kort geleden in mijnbouw gewonnen. Gesteenten van Carboonouderdom zijn slechts op één locatie in Nederland aan de oppervlakte te zien, namelijk in de oude Heimans-zandsteengroeve bij Epen in Zuid-Limburg.

• Woestijn

In het Perm (290 – 248 miljoen jaar geleden) is ons land een soort woestijngebied, waarin stuifduinen en meestal droogstaande riviervlaktes voor de vorming van zandstenen en samengestelde steensoorten (conglomeraten) zorgen. Zo ontstond onder andere de Slochteren-zandsteen. Deze zandsteenlaag bevindt zich in de ondergrond van Noord Nederland en is bekend omdat zich hierin het aardgas uit de fameuze 'aardgasbel' van Groningen heeft verzameld. In de diepere delen van het woestijngebied vormt zich een groot zoutmeer, waarin ook geregeld de zee weer binnendringt. In dit zoutmeer vormen zich steenzout, kalium/magnesium-zouten, en daarnaast anhydriet en dolomiet.

Steenzout is vooral bekend door de zoutwinning in Groningen. Door temperatuur en druk wordt steenzout plastisch vervormbaar in de diepe ondergrond, waardoor het zich als een stroperige massa via breuken in de ondergrond een weg omhoog kan banen. Dit is de oorsprong van de zogenaamde zoutpijlers die vooral in Noord Nederland tot relatief dicht onder de oppervlakte voorkomen.

• Fossielen

In het Trias (248 – 205 miljoen jaar geleden) bevindt Nederland zich boven zee-niveau, maar ook vormen zich ondiepe zoute binnenzeeën. In deze situatie ontstaan zand- en kleistenen, maar ook kalksteen, mergel, en indampingsgesteenten zoals steenzout.

Gesteenten van Trias-ouderdom zijn alleen in Oost-Nederland aan de oppervlakte te vinden, zoals in de Muschelkalkgroeve bij Winterswijk. In deze groeve zijn fossielen van diverse schaal- en schelpdieren te vinden, maar ook zijn er pootafdrukken en fossiele resten van sauriërs, een hagedisachtige reptiel, aangetroffen.

• Vulkanisch

Tijdens de Jura (205 – 142 miljoen jaar geleden) wordt Nederland weer door de zee overspoeld. In deze zee vindt de vorming van kalksteen, kleisteen en schalies (lei) plaats. In een deel van dit tijdvak bevindt Nederland zich weer deels boven water, zodat zich tevens continentale klei- en zandstenen met steenkoollagen kunnen vormen. Bijzonder is dat in de Juraperiode in de buurt van Vlieland een echte vulkaan heeft bestaan, waarvan de ringstructuur van de krater (caldera) met seismische technieken herkenbaar is.

Deze vulkaan heet ook wel de Zuidwalvulkaan, en bevindt zich nu op een diepte van meer dan twee kilometer onder de Waddenzee.

• Tropische zee

De geologische periode van het Krijt (142 – 65 miljoen jaar geleden) is evenals de Jura bij de meeste mensen bekend als de periode van de dinosauriërs, die in het Mesozoïcum over de wereld heersen. Nederland is in het Krijt overwegend bedekt door een warme (tropische) zee. In het begin van het Krijt vormen zich vooral zand- en kleistenen en mergel. Zandstenen uit deze periode zijn in Nederland vaak het reservoirgesteente voor aardolie.

Later in het Krijt wordt de zee steeds helderder en warmer. Deze zee krioelt van het leven, waaronder talloze eencellige organismen (foraminiferen). Het neerdwarrelen van de kalkskeletjes die deze organismen na hun dood achterlaten, zorgt voor een dik pakket van de bekende witte krijtrots. Deze is goed te bestuderen in Zuid Limburg, in bijvoorbeeld de ENCI-groeve in de St-Pietersberg bij Maastricht. De lichtgekleurde kalksteen wordt afgewisseld door mergelachtige lagen en lagen met vuursteen. Deze vuursteen werd in de prehistorie door de mens in kleine mijntjes gewonnen om er bijlen en pijlpunten van te vervaardigen.

• Meteoriet

Het einde van het Krijt en daarmee van het gehele Mesozoïcum wordt gekenmerkt door een inslag van een grote meteoriet in zee voor de kust bij Yucatan in Mexico. Een groot deel van het leven overal op aarde (waaronder alle dinosauriërs) sterft hierdoor uit. Daarmee begint het Kenozoïcum, met als eerste periode het Tertiair (65 – 1,8 miljoen jaar geleden). De geologische situatie van Nederland wordt vooral bepaald door een daling van het Noordzeebekken.

Dit gaat gepaard met een snelle opvulling van het bekken met sedimenten. Gedurende het gehele Tertiair wordt zo een sedimentpakket met een dikte van circa 3,5 kilometer opgehoopt!



• Zeespiegel

De periode van het Tertiair kenmerkt zich door sterke klimaatveranderingen die grote fluctuaties van de zeespiegel met zich meebrengen. Eerst wordt de bekken-daling voornamelijk gevuld met mariene zand- en kleilagen. Een in de geotechniek bekende afzetting uit deze periode is de zogenaamde Boomse Klei, een zeer stijve mariene klei met pyriet- of markasiet-concreties. Daarna wordt riviersedimentatie vanuit het oosten steeds belangrijker. Vervolgens heerst er een subtropisch klimaat met meren, bossen en moerassen. Het gebied wordt vaak door de zee overspoeld. In de natte bossen en moerassen vindt veenvorming plaats, waaruit later onder invloed van druk en temperatuur bruinkool wordt gevormd. Deze bruinkool komt op zeer geringe diepte voor in Zuid-Limburg en net over de grens in Duitsland, waar de bruinkool in enorme dagbouwminen wordt ontgonnen.

Langzaam aan wordt het klimaat koeler, en beginnen de voorlopers van Rijn en Maas een rol te spelen. Dit proces wordt steeds sterker en dikke pakketten deltasedimenten vullen het Noordzeebekken op. Tertiaire sedimenten komen in geheel Nederland onder de oppervlakte voor, en zijn aan de oppervlakte ontsloten in Oost-Nederland en Zuid-Limburg.

• Mammoeten

In het Kwartair (1,8 miljoen jaar geleden tot heden) wordt de Nederlandse ondiepe ondergrond zoals we die nu kennen, vorm gegeven. Deze periode staat bekend om de zeer sterke klimaatwisselingen. Perioden van extreme koude (ijstijden of glacialen) wisselen zich af met warmere tot zelfs subtropische tussenperioden (tussenijstijden of interglacialen). Nederland is in het Kwartair een deltagebied, waarin zowel mariene sedimenten als continentale sedimenten worden afgezet. In het algemeen kun je zeggen dat in de warme interglacialen zich in Nederland een rijke vegetatie ontwikkelt, waarin allerlei nu exotische dieren voorkomen, zoals olifanten, neushoorns, leeuwen en tijgers, nijlpaarden en zelfs apen. In de koudere ijstijden is het land slechts spaarzaam met vegetatie bedekt.

Na de tweede helft van het Kwartair ontwikkelen zich dieren die goed bestand zijn tegen de extreme koude, zoals de wolharige mammoet en de wolharige neushoorn. Vanaf dat moment begint ook de mens zijn stempel op de Nederlandse flora en fauna te drukken.

• Dikke ijskap

Het eerste deel van het Kwartair heet het Pleistoceen. In deze periode wisselt een ijstijd zich een aantal malen af met een tussenijstijd. Het landschap van de noordelijke helft van Nederland is vooral vorm gegeven in een van de koude periodes van het Pleistoceen, het Saalien (370.000 – 130.000 jaar geleden). In deze koude



Stuwwal in de groeve bij Mook

periode bedekt een dikke ijskap de noordelijke helft van ons land. De stuwwallen die hierbij ontstaan, zijn nog steeds dominant in ons landschap.

Het huidige tijdsbestek heet in de geologische tijdschaal het Holocene. Deze periode beslaat de laatste 10.000 jaar en is een warme periode ofwel interglaciaal. Het is goed mogelijk dat een volgende ijstijd deze warme periode op zal volgen, waarmee dan het einde van het huidige interglaciaal wordt bereikt.

Door de sterke klimaatschommelingen fluctueert in het Kwartair de zeespiegelstand zeer sterk. Na de laatste ijstijd bij het begin van het Holocene is de zeespiegel circa honderd meter lager dan tegenwoordig. Vanaf het Holocene wordt het klimaat warmer en stijgt de zeespiegel gestaag. Er ontstaan uitgebreide kust- en riviervlaktes, waarin de jongste sedimentlagen zich afzetten op de onderliggende pleistocene sedimenten.

Afzettingpakketten

In het Kwartair zijn diverse soorten sedimenten gevormd. De bekendere geologische afzettingpakketten ofwel formaties zijn:

- Mariene afzettingen gevormd in de ondiepe Noordzee, te weten zanden en kleien. Voorbeelden zijn: de Eemformatie (met name in Noordwest-Nederland), de Formatie van Oosterhout, de Formatie van Breda.
- Rivierafzettingen; overwegend grove tot grindige zanden; zoals de Formatie van Kreftenheije, Formatie van Urk, Formatie van Sterksel, Formatie van Harderwijk.
- IJstijdafzettingen; vorming van sedimenten die direct samenhangen met de landijsbedekking zoals smeltwaterafzettingen, grondmorenes (keilemen), en andere afzettingvormen. Voorbeelden: Formatie van Drenthe en de Formatie van Peelo (met de bekende in Noord-Nederland voorkomende 'potklei').
- Landafzettingen bijvoorbeeld door de wind, vorming van veen en lokale beekafzettingen. Voorbeelden zijn de Formatie van Bostel (o.a. de dekzanden van de vroegere formatie van Twente), Formatie van Stamproy, Formatie van Nieuwkoop (met daarin veenpakketten als het Hollandveen en het Basisveen), Formatie van Woudenberg en de Formatie van Viller (bruinkoollagen in Zuid-Limburg).

Draagkracht

In Nederland is een dik pakket aan diverse grondsoorten als klei, veen, zand, grind, löss en leem gevormd. Dit doorgaans slappe bodempakket is bepalend voor het gebruik van de bodem door de mens en hoe huizen, wegen, en kunstwerken als bruggen en viaducten worden gebouwd. Slappe lagen als veen, klei en leem hebben geen of een zeer geringe draagkracht. Zandlagen van voldoende dikte hebben wel voldoende draagkracht om er bouwwerken op te funderen. Globaal kan gezegd worden dat de bovengrond in het oosten en zuiden meestal uit zand bestaat en in het westen uit samendrukbare klei- en veenlagen.

Grondsoorten

In Nederland komen de volgende grondsoorten het vaakst voor:

Zand en grind

Zand en grind zijn opgebouwd uit tamelijk grote korrels, die onderling geen samenhang hebben. Hooguit kan van wat haakweerstand worden gesproken. Zand en grind zijn goed waterdoorlatend en moeilijk samendrukbaar. Het onderscheid tussen zand en grind wordt bepaald door de grootte van de korrels. De korrels tussen 0,063 mm en 2 mm noemen we zand en die tussen 2 mm en 64 mm grind. Als de korrels groter worden dan 64 mm, spreken we van stenen.

Klei, leem, löss en silt

Als de grondkorrels kleiner zijn dan 0,063 mm, dan wordt er van silt (vroeger slib), klei of leem gesproken. Deze grondsoorten zijn samendrukbaar en slecht waterdoorlatend. Er is geen goed onderscheid te maken tussen leem en klei. Van leem kan gezegd worden dat de korrels minder onderlinge samenhang hebben dan klei en dat het minder samendrukbaar is.

Veen

De hierboven genoemde grondsoorten zijn allemaal uit minerale korrels (steen) opgebouwd. Veen bestaat uit de vezelige overblijfselen van planten en struiken, die slechts gedeeltelijk zijn vergaan door gebrek aan zuurstof. Het heeft vaak een horizontale structuur, is sterk samendrukbaar en heeft een hoog watergehalte.

Als klei en veen worden belast, worden ze samengedrukt en gaat een bouwwerk na verloop van tijd verzakken. Dit veroorzaakt klemmende deuren en scheuren in de muren. In dat geval moet naar diepere zandlagen worden gezocht, om het bouwwerk op palen te kunnen funderen. In het oosten en zuiden van ons land bevindt zich vaak zand aan de oppervlakte, zodat hier vaak direct op kan worden gebouwd.

Als het bouwwerk rechtstreeks op een draagkrachtige topzandlaag wordt geplaatst, dan spreken we van een fundering op staal. Als de belasting via palen naar de ondergrond wordt overgebracht, dan spreken we van een fundering op palen.

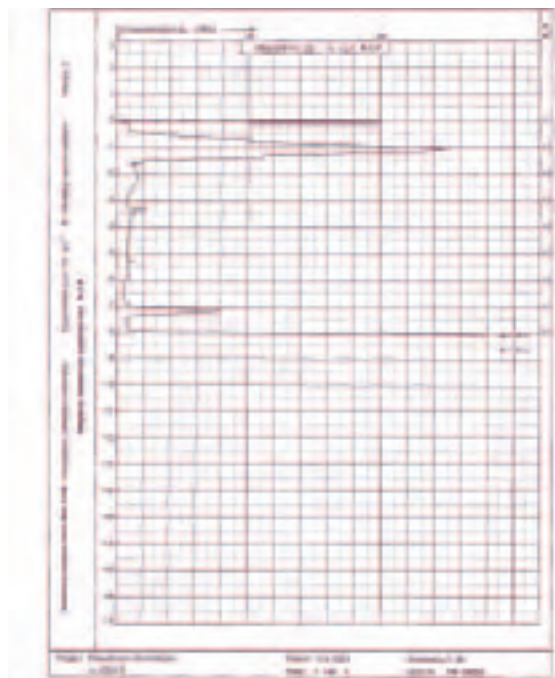
Raadselachtige schade

Kennis van de geologie en de plaatselijke bijzonderheden van een bouwterrein zijn vaak van groot belang voor het juist kunnen interpreteren van bodemonderzoeksresultaten.

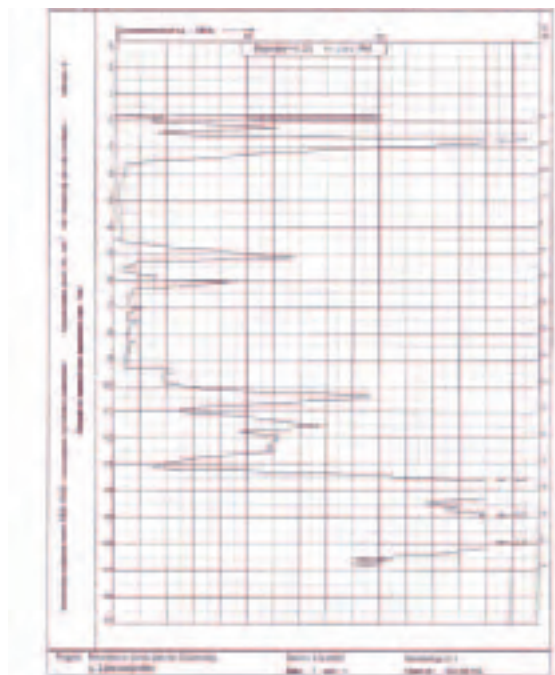
Een voorbeeld. Een paar jaar geleden werd een geotechnisch adviseur door een constructeur geraadpleegd over een ernstig schadegeval. Door hem waren twee identieke meetgebouwen ontworpen. Kort na de bouw vertoonde het ene gebouw ernstige schade, terwijl het andere geen scheurtje vertoonde. Het ene gebouw stond in Leeuwarden, het andere in Joure. De sonderingen zagen er voor de constructeur, en waarschijnlijk voor iedere andere oppervlakkige beschouwer, redelijk gelijk uit, zoals dat ook uit de twee nevenstaande sondeergrafieken blijkt.

Beide meetgebouwtjes werden op staal gefundeerd en omvatten één bouwlaag. De fundering bestond uit een ongeveer tachtig centimeter brede gemetselde strokenfundering. Op de betonvloer, die op de funderingstroken was gelegd, stonden gemetselde tussenwanden. In Joure bleef het gebouw scheurloos staan, maar in Leeuwarden moest het gebouw na één jaar worden gesloopt. De sondering in Leeuwarden lijkt echter beter dan die in Joure.

Als men zich op de hoogte had gesteld van de historie van het bouwterrein in Leeuwarden, dan had men kunnen weten dat daar van nature direct onder het maaiveld geen vier meter dikke vaste zandlaag voorkomt. Dit was hier dus ook niet het geval. Voor het bouwrijp maken van het terrein, bleek in een laag gedeelte van Leeuwarden-Oost bovenop een sterk samendrukbaar veenpakket een drie meter dikke zandlaag te zijn opgebracht. Minder dan een jaar na de ophoging werd de fundering gelegd. In het veen moest toen nog een zetting van zeker twintig tot dertig centimeter worden verwacht. Bovendien kruisten ook nog enkele gedempte sloten de plattegrond. De verschillen in de dikte van de ophoging veroorzaakten ook zettingsverschillen in de ondergrond. Omdat de binnenwanden op dragende vloeren stonden, werd het nieuwe meetgebouw binnen één jaar een bouwval. Enig basisbegrip over de opbouw en de ontstaansgeschiedenis van de bovengrond van ons land had deze catastrofe kunnen voorkomen.



Sondeergrafiek Joure



Sondeergrafiek Leeuwarden



3 PRAKTIJK VAN HET BOUWEN

Als een architect een gebouw ontwerpt, staan allereerst de eisen van de opdrachtgever centraal. Wat voor soort gebouw, welke stijl, de inrichting zijn de uitgangspunten bij het eerste schetsontwerp. Zodra deze schets er ligt, moet bekeken worden of de wensen van de opdrachtgever ook haalbaar zijn. Iemand kan een diepe kelder onder een gebouw willen, maar als de grondwaterstand te hoog is, levert dat zeker problemen op bij het bouwen, en na oplevering wellicht een natte kelder. Ook zullen de burens niet blij zijn als zij door graafwerkzaamheden opeens zonder stroom komen te zitten, omdat er een kabel is geraakt.

Niet alleen de opdrachtgever, maar ook de omgeving stelt dus eisen aan de bouw. In elk geval moet bekend zijn hoe diep er wordt gegraven, de afstand tot andere gebouwen, de funderingswijze daarvan en dergelijke (zie checklist). Om niet voor verrassingen te komen staan, moet een aantal vooronderzoeken worden gedaan.

Checklist

Wat moet bekend zijn voordat met de bouw kan worden begonnen:
• De oppervlakte van het bouwwerk.
• Hoe diep moet worden gegraven in relatie tot de grondwaterstanden.
• De afstand van de nieuwbouw tot aangrenzende gebouwen en wegen.
• De aanwezigheid van kabels en leidingen in de directe omgeving.
• De funderingswijze van aanliggende gebouwen.
• Stelt de omgeving milieutechnische eisen voor trillings- en geluidshinder tijdens de bouw?
• Zijn er bodemverontreinigingen aanwezig?
• Was het terrein vroeger bebouwd en zitten er misschien puin- of funderingsresten in de grond?

Vooronderzoeken

• Archiefonderzoek

Allereerst is een historisch onderzoek nodig, zodat bekend is of het terrein eerder bebouwd is geweest. Ook de functie van die vroegere bebouwing is van belang. Een

woonhuis geeft doorgaans minder problemen dan bijvoorbeeld een drukkerij of leerlooierij, omdat in de laatste gevallen de grond misschien is vervuild. Een bodemverontreiniging vormt een ernstig gezondheidsrisico voor de uitvoerenden en het schoonmaken van de bodem vergt veel extra tijd en geld. Ook funderingsresten en puin kunnen tijdens de uitvoering grote problemen geven. De geschiedenis van het terrein heeft dus grote invloed op de uitvoering van het werk en de werkplanning.

Met het archiefonderzoek is vast te stellen of de bouwplaats milieutechnisch als verdacht of onverdacht moet worden aangemerkt. Bij verdachte terreinen is een uitgebreider milieutechnisch onderzoek nodig. Wanneer de bouwplaats moet worden droog gepompt, moet ook worden nagegaan of in de ruimere omgeving bodemverontreinigingen aanwezig zijn. Door een bemaling kunnen deze zich verplaatsen en op andere plaatsen een probleem gaan vormen.

• Kabels en leidingen

Wie gaat graven moet eerst uitzoeken of er kabels en leidingen van openbare nutsbedrijven (gas, water, elektriciteit, kabel-tv en dergelijke) in de grond liggen. Het is immers niet de bedoeling gas- of waterlekken te veroorzaken, of dat de bodemonderzoeker onder stroom komt te staan. Op bedrijfsterreinen kunnen inlichtingen worden ingewonnen bij het bedrijf zelf. Wanneer in openbaar gebied wordt gegraven (rijk, provincie, gemeente) moet vooraf een aanvraag worden gedaan bij het landelijke Kabels en Leidingen Informatie Centrum (KLIC), ook wel KLIC-aanvraag genoemd. KLIC stuurt de aanvraag door naar de betrokken kabel- en leidingbeheerders. Zij geven binnen drie dagen informatie over de ligging van de kabels en leidingen. Als geen KLIC-aanvraag is gedaan en er wordt een leiding beschadigd, dan zal de verzekering die schade zeker niet vergoeden.

Er is op dit moment geen wet die voorschrijft wat bij graafwerkzaamheden de verplichtingen zijn van de verschillende partijen. Wel blijkt uit jurisprudentie dat iedere partij zijn eigen verantwoordelijkheid heeft.

- De opdrachtgever moet voor de aanbesteding informatie verzamelen over het terrein waar hij graafwerkzaamheden wil (laten) uitvoeren. In het ontwerp moet rekening gehouden worden met de aanwezigheid van kabels en leidingen. Zo nodig voert de opdrachtgever overleg met de beheerders.
- De zogenoemde 'grondroerder' (degene die de graafwerkzaamheden verricht) heeft onderzoeksplicht en moet dus nagaan wat er aan kabels en leidingen ligt in de bodem. Alleen tekeningen opvragen is niet voldoende. De informatie op de tekening moet geverifieerd worden door bijvoorbeeld het graven van proefsleuven. Op een tekening staat aangegeven hoe de kabel of leiding ooit gelegd is; in de loop van de tijd kan dat door allerlei omstandigheden veranderen.

- De kabel- en leidingbeheerders hebben informatieplicht bij de uitvoering van grondroeringen. De beheerder kan bijvoorbeeld een tekening verstrekken over de ligging van haar belang, maar kan de informatie ook op een andere wijze verstrekken (bijvoorbeeld door aanwijzen).

Klikken

Een KLIC- aanvraag indienen kan eenvoudig per:

- telefoon: 0800 - 0080;
- fax: 0346 - 28 75 85;
- e-mail: aanvraag@klic.nl;
- on-line: via www.klic.nl. Dit is de enige dienst waarvoor KLIC kosten in rekening brengt. Er kan hiervoor een abonnement aangeschaft worden.

De volgende gegevens zijn nodig:

- Startdatum van de werkzaamheden (3 tot 20 werkdagen van tevoren kan een aanvraag worden gedaan).
- Naam, adres en contactgegevens van de opdrachtgever.
- Naam, adres en contactgegevens van de aannemer.
- Het tekening-verzendadres.
- Een locatieomschrijving (woonplaats, straatnaam en eventueel huisnummer of een andere woordelijke omschrijving van de locatie).
- Het soort werk dat verricht wordt.

• Hydrologisch vooronderzoek

Het is belangrijk om een goed inzicht te hebben in de grondwaterstanden en waterspanning in de diepere grondlagen. In een bouwput die volloopt met grondwater is het lastig bouwen, om maar niet te spreken van de ellende wanneer de bodem van de bouwput omhoog komt door een te hoge waterspanning! Het droog houden van een bouwput door te pompen (bemaling) is een kostbare zaak. Als het tegenzit, kunnen de benodigde vergunningen bovendien voor meer dan een half jaar vertraging zorgen.

Inlichtingen inwinnen

Om een eerste indruk in de grondwaterstand en de waterspanning te krijgen, kunnen inlichtingen worden ingewonnen bij:

- de dienst Gemeentewerken van de betreffende plaats;
- het betreffende Waterschap;
- het Grondwaterarchief van NITG-TNO (<http://dinoloket.nitg.tno.nl>);

- kaarten van Alterra (www.alterra.wageningen-ur.nl).

De informatie wordt meestal tegen betaling verstrekt. Deze kosten wegen echter niet op tegen de enorme kostenpost van een bemaling.

Als de bouwput moet worden drooggemaakt door de grondwaterstand te verlagen (bronbemaling), dan is mogelijk een bemalingsvergunning nodig. Dit is afhankelijk van de gevoeligheid van de omgeving voor grondwaterstandverlaging (droogteschade, zettingsgevoeligheid), de op te pompen hoeveelheid water en de duur van de bemaling. In het algemeen kan ervan worden uitgegaan dat bij een onttrekking van minder dan tien m³ per uur geen vergunning of melding nodig is. Als meer wordt onttrokken, meestal tot honderd m³ per uur en gedurende maximaal zes maanden, dan moet de bemaling worden aangemeld bij de provincie, maar is geen vergunning vereist. Dit moet wel met een berekening en een bemalingsrapport worden aangetoond. De beoordelingscriteria hiervoor kunnen overigens per provincie verschillen.

Als meer water moet worden onttrokken of als de bemaling langere tijd in bedrijf is, dan moet een bemalingsvergunning worden aangevraagd. Hiervoor moet de te verpompen hoeveelheid water worden berekend. Dit technisch bemalingsrapport en een vergunningsonderbouwend rapport moeten bij de vergunningsaanvraag worden gevoegd. Na het indienen van de aanvraag wordt een vergunningsprocedure gestart. Iedereen die bezwaar heeft tegen de bemaling, kan dit dan kenbaar maken. De totale procedure neemt meestal zes á zeven maanden in beslag en is dus van grote invloed op de bouwplanning.

Kostenpost

Een bemaling kan een grote kostenpost vormen. Denk aan:

- het installeren van de bemaling;
- energiekosten;
- lozingskosten (gemeente, waterschap);
- legeskosten voor het verkrijgen van de bemalingsvergunning;
- belasting over de onttrokken hoeveelheid;
- verzekering van eventuele schade.

Bedragen van € 0,25 per geloosde kubieke meter water (prijsspeil 2006) zijn hierbij niet vreemd!!

Door de bemaling kunnen de grondwaterstanden tot in de wijde omtrek worden beïnvloed. Hieraan moet veel aandacht worden besteed. De grondwaterstanddaling kan schade veroorzaken aan het wortelstelsel van beplanting (landbouwgewassen, bomen), infrastructuur (verzakking van straten en rioleringen) en



Bronbemaling

bebouwing. Daarom verdient het aanbeveling om op kritieke punten ruim van tevoren peilbuizen te plaatsen waarmee de waterstand kan worden afgelezen. Door deze regelmatig te meten kan worden aangetoond of een klacht al dan niet terecht is. Ook informatie over de te verwachten hoogste en laagste grondwaterstand is een vereiste.

• Milieutechnisch onderzoek

Aan de hand van het historisch onderzoek dat volgens de landelijke norm NEN 5725 (meer over NEN in hoofdstuk 10) vereist is, kan worden vastgesteld of het bouwterrein in milieutechnisch opzicht al dan niet verdacht is. Vervolgens wordt aan de hand van NEN 5740 het benodigde milieutechnisch bodemonderzoek vastgesteld. Afhankelijk van het oppervlak van de toekomstige bebouwing, bestaat dit uit een aantal korte grondboringen en een kleiner aantal diepere boringen. Van de opgeboorde grond worden monsters genomen die volgens een standaardprocedure chemisch worden onderzocht in een laboratorium. Hierbij wordt vooral gecontroleerd op de aanwezigheid van aromatische koolwaterstoffen (paks), gechloreerde koolwaterstoffen (cfk's) en zware metalen. Als verontreinigingen worden aangetroffen, moet een uitgebreider onderzoek worden ingesteld.

Ook het grondwater moet worden onderzocht op verontreinigingen. Hiervoor plaatst men in een of meer boorgaten een peilbuis. Een week later wordt hieruit een (grond)watermonster onttrokken, dat op verontreinigingen gecontroleerd kan worden.

Als vrijkomende grond moet worden afgevoerd, dan moeten in het kader van het Bouwstoffenbesluit monsters van deze grond worden genomen. Het hoeft geen betoog dat de opslag en verwerking van vervuilde grond kostbaar is. Het keuren en rapporteren van dit onderzoek mag slechts gedaan worden door gecertificeerde en door VROM erkende bedrijven.

• Archeologisch onderzoek

Wie kent niet de verhalen van potten met Romeinse munten die tijdens een bouw naar boven komen. Zo'n archeologische vondst kan aantrekkelijk zijn, maar meestal is het vooral een kostenpost. In het Verdrag van Malta is overeengekomen dat de gemeenten een zorgplicht hebben voor het archeologisch erfgoed. Zij moeten daarom een beleidsplan opstellen voor de bescherming van archeologische vindplaatsen.

Opgravingen worden alleen in uiterste noodzaak uitgevoerd, maar vindplaatsen moeten wel worden beschermd. Dit kan ertoe leiden dat archeo-technische berekeningen moeten worden uitgevoerd om te kunnen voorspellen wat er met de archeologische resten gebeurt als bodemingrepen plaatsvinden. Hiertoe kan een

archeologisch veld- en bureauonderzoek worden uitgevoerd, aan de hand waarvan men kan bepalen of eisen moeten worden gesteld aan de toekomstige beplanting, de grondwaterstand, de funderingsmethode, enzovoort. Bij keuze voor een fundering op palen kan het bijvoorbeeld noodzakelijk blijken om het palenplan aan te passen. Bij een fundering op staal kan de ontgravingsdiepte beperkt worden. Dit vereist meestal een nauwe samenwerking tussen een geotechnisch en een archeologisch adviesbureau. De kosten van het archeologisch bodemonderzoek worden verhaald op de bodemverstoorder.

• Explosievenonderzoek

Ook kan het vermoeden bestaan dat er onontplofte bommen (blindgangers) op de bouwplaats liggen. In dat geval moet eerst een historisch onderzoek worden uitgevoerd. Dit moet gebeuren conform het Bijdragebesluit Kosten Ruiming Explosieven Tweede Wereldoorlog 1999 van het Ministerie van Binnenlandse Zaken (BiZa) en de BeoordelingsRichtlijn Opsporing Conventionele Explosieven (BRL-OCE), opgenomen in het Arbeidsomstandigheden Besluit.

Het demonteren van een vliegtuigbom



Het onderzoek (een bureaustudie) moet door een gecertificeerd bedrijf worden uitgevoerd en worden afgesloten met een rapportage. Hierin wordt verslag gedaan van de resultaten van het historisch onderzoek (lijst met bombardementen en gevechtshandelingen), eventueel ondersteund met luchtfoto's. Het bevat een risico-inventarisatie en een risico-analyse en concludeert of het terrein zwaar verdacht is, verdacht, licht verdacht of niet verdacht.

Op basis hiervan wordt bepaald of nader veldonderzoek nodig is. Het veldonderzoek moet door een gecertificeerd bedrijf volgens bepaalde regels worden uitgevoerd. Tijdens dit veldonderzoek wordt per onderzoekspunt een meting verricht. Het resultaat is een 'vrijwaring' per onderzoekspunt. Aan de hand hiervan wordt een interpretatie gemaakt en doet men een uitspraak. Nadat een onderzoekspunt is vrijgegeven, mag de sondering of grondboring worden gemaakt op de geplande locatie. Indien het beeld daartoe aanleiding geeft, wordt het onderzoekspunt niet vrijgegeven. In dat geval moet het worden verplaatst.

Ondanks de vrijwaring kunnen kleine, niet gedetecteerde explosieven in de grond aanwezig zijn. Deze kunnen schade veroorzaken aan het materiaal en materieel. Werkzaamheden waarbij een spontane explosie voor kan komen, moeten worden afgedekt met een zogenaamde 'Plof-verzekering'.

• Bodemonderzoek

Om een keuze te kunnen maken voor een funderingsmethode of methode van bemalen, is het noodzakelijk de bodemopbouw te kennen. Daarvoor moet een bodemonderzoek worden gedaan. Vroeger was dat vrijwel onmogelijk en werd de grond nauwelijks onderzocht. Als ervaring in de omgeving voorhanden was, ging men hier op af. Als dat niet het geval was, dan werd die tijdens de bouw opgedaan en moesten doorlopend maatregelen worden getroffen om gemaakte fouten te herstellen.

Denk hierbij aan kerktorens, die tijdens de bouw al scheefzakten. Om de toren niet te scheef te laten staan, werd dan halverwege of eerder gecorrigeerd, zodat het bovenstuk weer recht kwam te staan. Een kromme toren is het gevolg. Hiervan zijn tal van voorbeelden. De bekendste is wel de toren van Pisa, maar ook in Nederland zijn voorbeelden te over.

Tegenwoordig wordt door de overheid een bodemonderzoek geëist. Deze eisen zijn verwoord in normbladen, zoals NEN 6740. Hierin worden de soort en het aantal terreinproeven voorgeschreven.

Aan de hand van een bodemonderzoek kan worden bepaald wat de beste fundering is voor een gebouw, bijvoorbeeld op palen of op staal, of welke lagen een gevaar vormen voor de stabiliteit van een dijklichaam of oeverbescherming.



Om te kunnen vaststellen of een bouwput met een bronbemaling moet worden droog gehouden, of dat met vuilwaterpompen (open bemaling) kan worden volstaan, moet de grondwaterstand bekend zijn. Bij diepe bouwputten moet ook de waterspanning in diepere lagen bekend zijn. Zo kan worden nagegaan of de bouwputbodem niet door de waterdruk wordt opgetild en openbarst. Deze metingen kunnen worden gedaan door peilbuizen te plaatsen en door informatie in te winnen bij het waterschap en de gemeente.

Een drassig werkterrein is erg lastig tijdens de uitvoering. Hierdoor kan het terrein moeilijk begaanbaar zijn en kan de stabiliteit van graafmachines en heien en hijskanen in gevaar komen. Ook daarom is het grondwaterpeil van belang. Uit het oogpunt van Arbo-wetgeving is inzicht hierin een vereiste. Tegenwoordig wordt ook in bestekken en overeenkomsten voor onderaanneming steeds meer geëist dat de begaanbaarheid van bouwplaatsen wordt onderzocht voordat de machines worden ingezet.

• **Laboratoriumonderzoek**

Om te kunnen berekenen welk damwandprofiel moet worden toegepast en hoe lang de planken moeten zijn, of in welke mate een terrein gaat zakken nadat het is opgehoogd, moet een laboratoriumonderzoek worden uitgevoerd op grondmonsters (zie ook hoofdstuk 9). Hiervoor moeten boringen worden gedaan, waarin 'ongerode monsters' worden gestoken; dit zijn stalen bussen die binnen een boorbuis in de grond worden geslagen of gedrukt en vervolgens, gevuld met grond, omhoog worden gehaald. In het grondmechanisch laboratorium wordt de grond uit de bussen gedrukt, waarna er proeven op kunnen worden gedaan. In de boring kan ook meteen een peilbuis worden geplaatst, zodat ook de stijghoogte van het grondwater kan worden bepaald.

De resultaten van het bodemonderzoek kunnen beter worden vergeleken als de plaats waar de sonderingen en boringen zijn gemaakt wordt ingemeten. Dit moet gebeuren ten opzichte van een duidelijk herkenbare lijn in het terrein, bijvoorbeeld het verlengde van een gevel van een gebouw of de as van een weg of, moderner, in rijkscoördinaten. Ook moet de maaiveldhoogte van het onderzochte punt worden gewaterpast ten opzichte van NAP.



4 TERREINONDER- ZOEK: SONDEREN

Om op een snelle en niet al te dure manier een indruk te krijgen van de opbouw van de ondergrond, kunnen het beste eerst sonderingen worden uitgevoerd. Meetfouten kunnen worden uitgesloten door altijd ten minste twee sonderingen uit te voeren (één = geen). Aan de hand van sonderingen kan de draagkracht van een paalfundering al worden berekend.

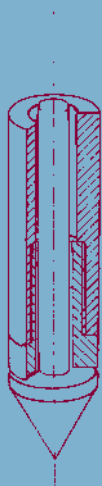
Bij een sondering wordt een stalen buis met een diameter van 36 mm met een snelheid van 20 mm per seconde in de grond gedrukt. Aan de onderzijde is de buis voorzien van een kegelvormige stalen punt (conus). De conus heeft meestal een oppervlak van 1.000 mm², maar er bestaan ook conussen met een puntoppervlak van 1.500 mm². Tijdens het indrukken wordt de weerstand die de conus in de grond ondervindt en eventueel de wrijvingskrachten op (een deel van) de staaf, elke 20 mm gemeten. De gegevens worden meestal digitaal opgeslagen. Het verloop van de sondering kan doorgaans ook in de sondeerwagen op een beeldscherm worden gevolgd.

Geschiedenis van het sonderen

De sondeertechniek is nog niet zo oud. Het eerste sondeerapparaat dateert van 1932, het zogenaamde Barentsen-apparaat, genoemd naar de rijksambtenaar B. Barentsen die als eerste sonderingen uitvoerde voor een weg nabij Gouda. Dit deed hij door met de hand en gebruikmakend van zijn eigen gewicht, een conus van tien cm² in de grond te drukken. Hij bedacht een manier om de grondweerstand op de conuspunt nauwkeurig te meten. Hij bracht hiervoor een binnenstang aan in de buis en drukte met deze binnenstang handmatig op de binnenzijde van de punt. De grondweerstand kon worden afgelezen via een hydraulische meetkop die was voorzien van een manometer.

De op de manometer afgelezen oliedruk, vermenigvuldigd met het oppervlak van de zuiger (plunjer-oppervlak) van de meetkop, gaf de uitgeoefende kracht weer. Door deze vervolgens te delen door het conusoppervlak, werd de conusweerstand (spanning) verkregen. Het mechanisch sonderen was geboren. Omdat

Figuur 4.1 Conus van Huizinga



Figuur 4.2 Sondering in 1935

de maximale kracht waarmee de binnenstang wordt weggedrukt door het gewicht van een man (ca. 80 kg) moest worden geleverd, was de maximaal meetbare conusweerstand niet zo groot. Het apparaat werd dan ook uitsluitend gebruikt voor onderzoek naar de dikte en vastheid van slappe veen- en kleilagen.

• Meer kracht

Om ook in vastere grondlagen sonderingen te kunnen uitvoeren, ging men al snel op zoek naar manieren om met meer kracht dan het lichaamsgewicht van één man een sondering te kunnen maken. Onder leiding van de directeur van het Laboratorium voor Grondmechanica (LGM) T.K. Huizinga, werd in 1935 de eerste (diep)sondering uitgevoerd met een kracht van maar liefst tien ton.

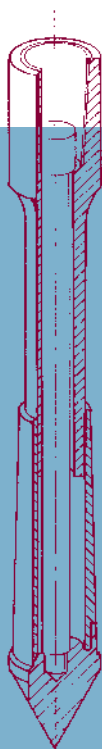
Hiervoor werd een wegdrukkapparaat ontwikkeld dat door mankracht werd aangedreven (figuur 4.1 en 4.2).

De reactiekracht voor het sondeerapparaat werd verkregen door een gat van 2

x 3 en 1 m diep te graven. Hierin werd een houten vloer gelegd met daaraan draadeinden, reikend tot boven het maaiveld. Het gat werd aangevuld met zand. Deze zes kubieke meter zand fungeerde als ballast. Het kostte wel drie dagen om een dergelijke sondering uit te voeren, maar toch was deze methode baanbrekend. Voor het eerst kon nu het draagvermogen van (houten) palen uit een sondering worden berekend. Tot dan moesten hiervoor proefpalen worden geheid.

Het duurde tot 1950 voor men een oplossing had gevonden om de meetfouten te vermijden die met de Barentsen-conus kunnen ontstaan doordat er zand tussen beide stangen komt. De oplossing heet de mantelconus, een uitvinding van Vermeiden (LGM). Boven de conuspunt zit een mantel die lossend van vorm is (figuur 4.3). Hierdoor wordt parasitaire wrijving op deze mantel (zeker in zand) geëlimineerd. De Belgische professor De Beer heeft deze stelling altijd bestreden, niet geheel ten onrechte, zeker in de Belgische tertiaire zanden en kleien. Hij gaf de voorkeur aan de 'conus met sluitmoer', een Barentsen-conus met een min of meer goed functionerende vuilafdichting.

Figuur 4.3 Mantelconus



• Hydraulisch

De handmatige aandrijving werd steeds meer vervangen door een hydraulische en de ballastvloer door hydraulisch aangebrachte grondankers. Door het wegdrukapparaat op een aanhanger of voertuig te plaatsen ontstonden de eerste sondeerwagens, met een gewicht van vier à acht ton. Verankering werd nog slechts toegepast wanneer voor diepsonderingen, aanvullend op het eigen voertuiggewicht, reactiekracht vereist was. De wagens werden steeds zwaarder, want sonderingen moesten steeds dieper worden gemaakt, omdat men betonpalen ging gebruiken in plaats van de veel lichtere houten palen. Betonpalen moeten in veel vastere lagen worden geheid dan houten palen. De dagproductie liep op naar drie sonderingen per dag (met verankering) en later zelfs naar zeven stuks.

• Doorbraak

Een nieuwe doorbraak volgde in 1965 met de door Begemann geleide ontwikkeling van de (mechanische) kleefmantelconus (figuur 4.4). Hij ervoer dat het gebruikelijke afleiden van het wrijvingsdraagvermogen van palen uit de zijdelingse totale wrijving op de sondeerbuisen zo zijn beperkingen heeft. Dat komt doordat de wrijving die een laag levert - zeker als de wrijving van deze laag geen tijd krijgt om zich te herstellen - minder wordt, naar gelang meer sondeerbuisen de laag passeren. Er ontstaat een soort smeerlaag langs de sondeerbuisen. Daarom moet deze wrijving over een kleinere hoogte en direct boven de conuspunt worden gemeten. Begemann publiceerde vervolgens grafieken om voor diverse paaltypen het wrijvingsdraagvermogen af te kunnen leiden uit de gemeten plaatselijke wrijvingsweerstand. Elk paalttype kreeg zijn eigen factor. Dat hierbij de kleefmantel niet alleen kleef, maar ook borstweerstand ondervindt, wordt verdisconteerd in deze factoren. Daarnaast kon nu uit het wrijvingsgetal (plaatselijke wrijvingsweerstand gedeeld door conusweerstand), voor normaal geconsolideerde gronden onder de grondwaterstand, de grondsoort worden afgeleid.

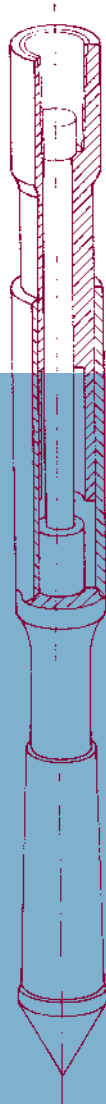
Doordat de totale indringweerstand niet langer nodig was om het paal draagvermogen te berekenen, mocht de totale wrijving langs de sondeerbuis teniet worden gedaan door het toepassen van een zogenoemde kleefbreker. Dit is een verdikking van de sondeerbuis op enige afstand boven de kleefmantel. Hierdoor wordt de totale indringweerstand lager en kunnen grotere diepten worden bereikt. Daarnaast doen weldra 20-tons (200 kN) sondeerapparaten hun intrede.

• Elektronica

De opkomst van de elektronica had vanzelfsprekend ook gevolgen voor de meettechnieken die bij sonderingen worden gebruikt. Tot nog toe werden de aflezingen

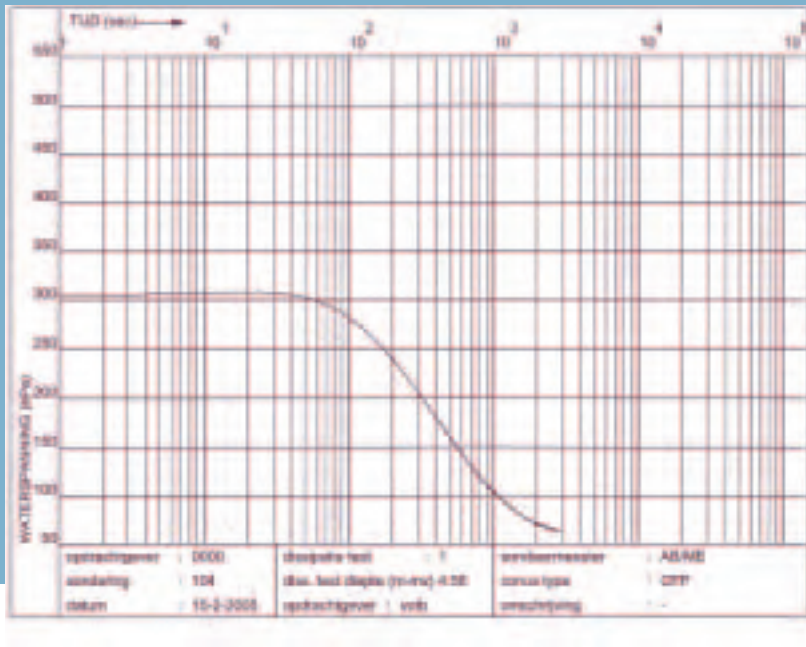
op de manometer met de hand genoteerd en later op kantoor eveneens met de hand uitgezet op millimeterpapier. Vanaf 1965 werd deze praktijk vervangen door een elektrische drukdoos, verbonden met een lijnschrijver, soms aangevuld met een ponsbandregistratie en nog later magneetbandregistratie en computer. Zo ontstond de elektrisch gemeten mechanische sondering.

De nadelen van het mechanisch sonderen gingen zich echter steeds nadrukkelijker manifesteren, doordat de sonderingen steeds dieper werden en de gemeten conusweerstand steeds hoger. Allereerst bleef er het probleem van de parasitaire wrijving



*Figuur 4.4 Mechanische
kleefmantelconus*

figuur 4.5 Grafiek dissipatieproef



tussen binnenstang en sondeerbuis. Daarnaast was er nog een nadeel: vaak liep de sondeerconus ongemerkt scheef weg in de diepte. Hierdoor kon in extreme gevallen de werkelijke sondeerdiepte vele meters minder zijn dan de (schuine) sondeerlengte. De oplossing voor deze problemen is de elektrische conus met ingebouwde hellingsmeter.

De eerste experimentele elektrische sondeerconussen dateren van de Tweede Wereldoorlog in Duitsland, gevolgd door exemplaren van de Rotterdamse gemeentebtenaar Bakker (1948) en Grondmechanica Delft (1949). Het was echter Fugro die in 1965 de elektrische conus als eerste invoerde voor routinematig onderzoek.

• Waterspanning

Midden jaren zeventig werden in Noorwegen, Zweden en later Frankrijk en Amerika voor het eerst waterspanningsconussen gebruikt. Hierbij werd de waterspanning in de grond gemeten tijdens het penetreren. Zo werd een extra parame-

ter verkregen, ter verfijning van de afleiding van de grondsoort uit de sondering. In Zweden paste Torstensson voor het eerst de zogenoemde 'dissipatieproef' toe. Uit gemeten verandering in waterspanning tijdens een sondeerpaauze kan de waterdoorlatendheid van leem, klei en veen worden berekend. De ontwikkeling van de interpretatie van grondparameters uit waterspanningssonderingen nam in de jaren tachtig een grote vlucht, met name in de Verenigde Staten, Canada, Scandinavië en ook in Nederland.

• Zonder meetkabel

Traditioneel wordt bij het elektrisch sonderen een hinderlijke meetkabel gebruikt, die door de sondeerbuizen loopt. Begin jaren tachtig volgt in Zweden de ontwikkeling van de memory-conus, waarbij de meetgegevens tijdens het sonderen in de conus worden opgeslagen. Later volgt de signaaltransmissie door akoestische trillingen en (in 2003) door laserlicht (optoconus).

Door het ontbreken van de meetkabel wordt het eenvoudiger om tijdens het sonderen een vloeistof te injecteren. Bijvoorbeeld een smerende vloeistof om de indringweerstand te reduceren, of een cement-bentonietspoeling om tijdens het trekken van de sondeerstreng het sondeergat af te dichten. Tevens wordt volledige robotisering van het sondeerproces bereikt.

Hedendaagse praktijk

Hoewel sonderingen overal ter wereld worden toegepast, worden dagelijks in Nederland ongeveer evenveel sonderingen gemaakt als in de hele wereld bij elkaar. Na Nederland volgt België, met name Vlaanderen. Dit komt omdat in andere landen de grond meestal zo hard is dat een sondering niet mogelijk is. Buiten België en Nederland wordt de sondering daarom vooral toegepast voor wegen en spoorlijnen. De nadruk ligt daarbij op het in kaart brengen van de dikte en eigenschappen (grondparameters) van samendrukbare lagen.

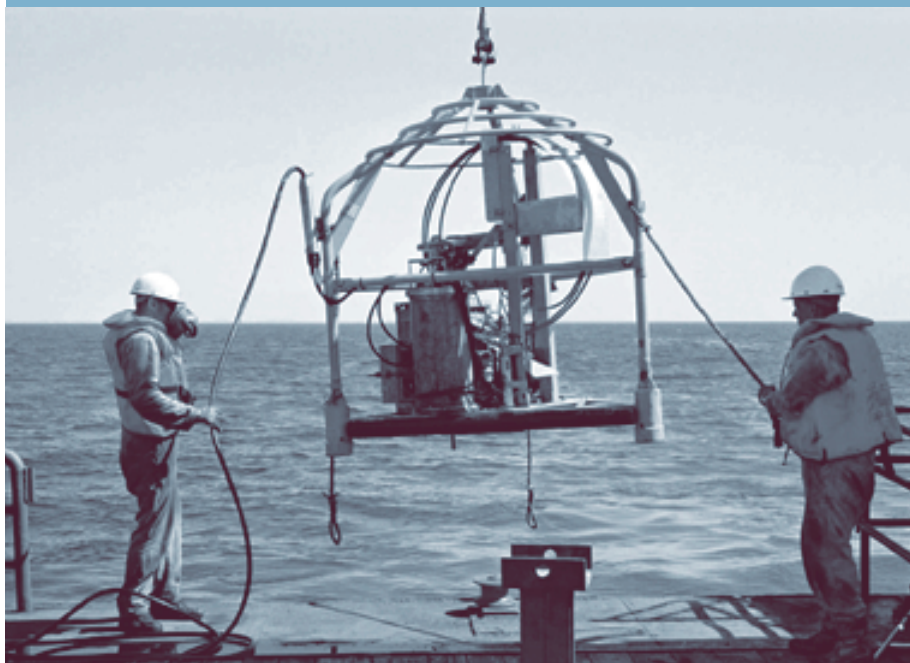
In Nederland wordt het overgrote deel van de sonderingen uitgevoerd ten behoeve van het funderingsadvies voor bebouwing. Daarnaast wordt de sondering vooral toegepast voor het ontwerp of de beoordeling van dijken, wegen, kunstwerken en waterbouwkundige constructies. Het aantal sonderingen in Nederland is mede zo hoog, omdat Nederland bij een funderingsadvies kortere afstanden tussen onderzoekslocaties hanteert (max. 25 meter) dan andere landen.

Nederland kent vier kwaliteitsklassen bij de sondering. Voor funderingsontwerp kan volstaan worden met klasse 2 of 3 en soms 4. Voor het bepalen van eigenschappen van samendrukbare lagen (grondparameters) wordt - afhankelijk van hoe slap deze lagen zijn - klasse 2 of zelfs 1 aanbevolen (zie ook hoofdstuk 10).

Op en onder water

Al in de jaren veertig werden in Nederland sonderingen te water uitgevoerd. Hiervoor zijn tegenwoordig voor elke nautische situatie talloze technieken beschikbaar, zoals:

- drijvend door een gat midscheeps;
- montage van het sondeerapparaat op een toren, voorzien van een geballaste voet;
- vanaf een hefeiland;
- met een op de bodem staand afstandsbediend sondeerapparaat (Zeekalf, Seascout enz.). Een bijzonderheid is dat hierbij soms gebruik wordt gemaakt van een kleinere diameter conus en sondeerbuis, die opgerold is op een haspel om de hoogte van de apparatuur te beperken;
- sondeerapparaat, aangebracht onderin een boorbuis (WISON).



Zoals al eerder vermeld, wordt bij een sondering een stalen buis met een diameter van 36 mm met een snelheid van 20 mm per seconde in de grond gedrukt. Aan de onderzijde is de buis voorzien van een kegelvormige stalen punt (conus). De conus heeft meestal een oppervlak van 1000 mm². Tijdens het indrukken wordt de weerstand die de conus in de grond ondervindt elke 20 mm gemeten. De gegevens worden tegenwoordig digitaal opgeslagen. Het verloop van de sondering kan meestal ook in de sonderwagen op een beeldscherm worden gevolgd.

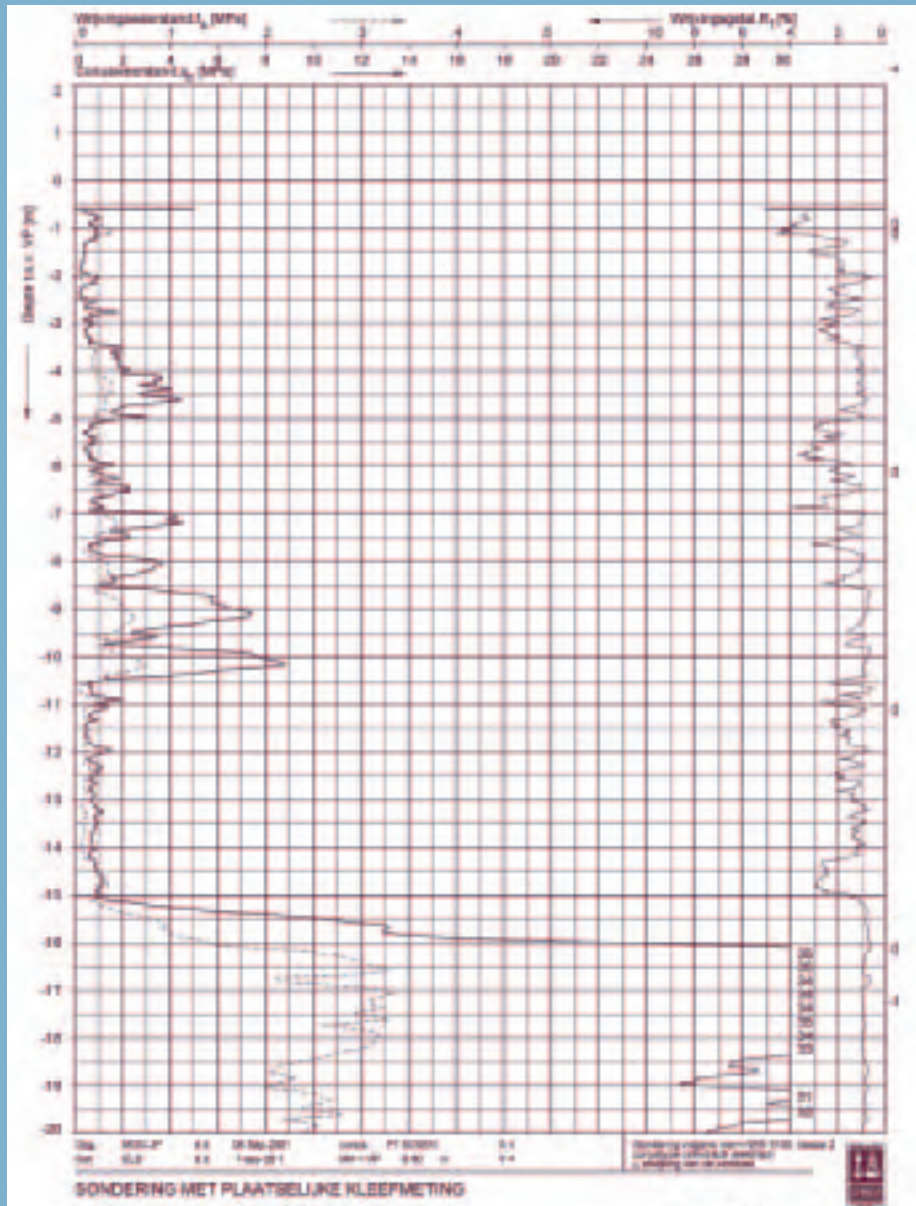
Als de sondering elektrisch wordt uitgevoerd, wordt ook de helling van de conus gemeten. Zo meet men of de sondering niet te krom gaat, waardoor de sondeerbuis zou kunnen breken. Op deze manier kan ook in de sondeergrafiek voor de diepte worden gecorrigeerd.

Het resultaat van een sondering is af te lezen uit een sondeergrafiek (zie figuur 4.6). Wat betekenen de afgelezen waarden? Conusweerstand van meer dan 2 á 3 MegaPascal (MPa) duiden op zandlagen. Lagere weerstanden worden meestal in samenhangende lagen (klei, leem, veen) gemeten. De laag op 15 meter diepte, waarin de conusweerstand oploopt tot 35 MPa, duidt dus op een zeer harde zandlaag, die prima als funderingslaag kan worden gebruikt.

Tijdens het sonderen kan ook vlak boven de conus de wrijving tussen een gedeelte van de sondeerbuis en de grond worden gemeten. Dit wordt de plaatselijke wrijving genoemd. Deze wordt ook in de sondeergrafiek uitgezet. In de sondeergrafiek is dat de stippellijn.

Door de plaatselijke wrijving uit te drukken als een percentage van de conusweerstand, ontstaat het wrijvingsgetal. Dit is op het sondeerblad de rechtse grafiek. Het wrijvingsgetal is van rechts naar links in de grafiek uitgezet. Voor grondlagen onder de grondwaterspiegel geeft het wrijvingsgetal een goede indicatie voor de grondsoort. Dit is van belang, omdat de grondsoort niet uit de conusweerstand alleen kan worden afgeleid. In tabel 4.7 wordt een indicatie gegeven voor het wrijvingsgetal van enige grondsoorten.

Figuur 4.6 Sondeergrafiek



verticale as: diepte van het meetpunt
stippellijn links: plaatselijke wrijving bij het inbrengen
dichte lijn links: conusweerstand (N/mm², MN/m² of MPa); dit is de gemeten weerstand (in N) gedeeld door het conusoppervlak (1000 mm²).

dichte lijn rechts: wrijvingsgetal; dit is de verhouding tussen de twee lijnen aan de linkerkant van de grafiek. Uit het wrijvingsgetal kan de grondsoort worden afgeleid.

De werkwijze van de sondering en de eisen waaraan moet worden voldaan, is omschreven in NEN 5140.

Grondsoort	Wrijvingsgetal
	[%]
Zand	0,8 – 1,2
Leem	1,2 – 3
Klei	3 – 6
Veen	6 en hoger

Tabel 4.7 Indicatie van de wrijvingsgetallen van verschillende grondsoorten

De conusweerstand zegt niets over de draagkracht van palen of een fundering op staal. Om deze te kennen moeten berekeningen worden gemaakt. Uit de conusweerstand en de plaatselijke wrijving kunnen tal van rekengrootheden worden afgeleid. Hierbij moet worden opgemerkt, dat verschillende onderzoekers tot evenzoveel verschillende correlaties komen.

Materieel

Voor het uitvoeren van sonderingen wordt in het algemeen gebruik gemaakt van hydraulische persinstallaties met een indrukcapaciteit van maximaal 20 ton. Deze persinstallaties kunnen gemonteerd zijn op gewone 6 x 6 vrachtwagens, de 'gewone' sondeerwagen, die met ballast wordt verzwaard tot een eigen gewicht van boven de 20 ton om in staat te zijn een feitelijke indrukkracht van 20 ton te bereiken.

Nadeel van deze sondeervoertuigen is dat bij slechte terreingesteldheid snel problemen ontstaan. Om toch met een zware machine in slecht terrein te kunnen werken is de 'track truck' ontwikkeld, een vrachtwagen uitgerust met een intrekbare rupsonderstel. Wanneer de terreinomstandigheden slechter worden, kan dit voertuig eenvoudig zijn rupsonderstel uitzetten en als rupsvoertuig verder gaan. Als vuistregel kan worden gesteld dat waar men kan lopen, men ook met de track truck terecht kan. Indien het terrein nog slechter begaanbaar is, kunnen zware sondeerrupsvoertuigen worden ingezet.

Waar de ruimte zeer beperkt is, kan een zogenaamde 'minirups' worden toegepast. Dit soort kleine sondeerrupsvoertuigen heeft zeer beperkte afmetingen en een laag eigen gewicht (circa 1,5 tot 3 ton), waardoor het op veel lastige locaties kan worden ingezet. Door het beperkte eigen gewicht van een minirups is het soms nodig het voertuig in de grond te verankeren, zodat er voldoende reactiekracht voor handen is. De indrukkracht is sterk afhankelijk van het aantal ingedraaide schroefankers en de kwaliteit van de grond. In slappe veenlagen valt bijvoorbeeld weinig reactiekracht uit de ankers te halen. Hier dient altijd rekening mee te worden gehouden.

Voor sondeerwerk op het water wordt gebruik gemaakt van speciaal daarvoor ontworpen onderzoekschepen, dan wel worden schepen of pontons met losse sondeerunits uitgerust.

Het wrijvingsgetal wordt vaak als een vaststaande en betrouwbare classificatiemethode gehanteerd. Dit is een misvatting. Zeker als zettingen een rol spelen, is het noodzakelijk om voldoende boringen uit te voeren.

rechtsboven: Track truck

rechtmidden: Minirups

rechtsonder: Ponton met losse sondeerunit

onder: Sondeerwagen





TERREINONDERZOEK: SONDEREN

'Bodemonderzoek? Dat doe je toch pas als er iets is mis gegaan?'

Bij de aanleg van een weg dacht men te kunnen volstaan met een groot aantal korte elektrische sonderingen. Uit kostenoverwegingen werden geen grondboringen uitgevoerd. Uit de sondeergrafieken bleek dat het wrijvingsgetal in een overal aanwezige bodemlaag op een diepte van anderhalf tot vier meter beneden maaiveld altijd drie à vier procent bedroeg. Aangezien een conusweerstand van 0,7 à 1,0 MPa werd gemeten, is dit geïnterpreteerd als een stijf leempakket. Het ontwerp van de wegfundering werd gemaakt en de schop ging de grond in.

Maar in plaats van een leemlaag vond men nu over de gehele lengte van het wegtracé een veenpakket. Dit had door een hoog percentage stuifzand een grotere vastheid gekregen. Hierdoor was het wrijvingsgetal teruggelopen tot drie à vier procent, wat voor veen een ongebruikelijk lage waarde is. De fysische eigenschappen van deze veenlagen, die direct onder de wegfundering kwamen te liggen, zijn sterk verschillend van stijve leemlagen. Het gevolg van de foutieve interpretatie en de 'kostenbesparende' beslissing om geen grondboringen uit te voeren, was dat de opbouw van de wegfundering en de ontgravingsdiepte aangepast moesten worden. Omdat al materialen waren besteld en de werkwijze moest worden aangepast, werd ook het werk vertraagd, waarmee een aanzienlijke som geld was gemoeid.

Vaak worden ook vergissingen gemaakt tussen overgeconsolideerde kleilagen (pot-, Boomse- en Groenlose klei) en vaste veenlagen in bijvoorbeeld de Eemformatie. Beide grondsoorten hebben eenzelfde conusweerstand en wrijving. Ook ten aanzien van klei boven en klei onder de grondwaterspiegel worden vaak verkeerde inschattingen gemaakt. Het materiaal is in beide gevallen gelijk, de wrijving of het wrijvingsgetal is daarentegen een factor drie à vier verschillend.



Interieur Sondeerwagen

Meten is weten

Met sonderen is veel meer te meten dan alleen de plaatselijke wrijving en conusweerstand. Zoals:

- **De sondeerwaterspanning**

Door het grondverdringend effect van de conus loopt in slecht doorlatende grond (zoals met water verzadigde klei) de waterspanning in de grondporiën op. Door de slechte waterdoorlatendheid kan dit overspannen water niet snel afstromen. In zeer dicht gepakte zandlagen kunnen de korrels uit elkaar worden gedrukt, wat een volumevergroting veroorzaakt (dilatantie). Hierdoor kan weer een afnemende waterdruk worden gemeten.

De meting van de waterspanning tijdens het sonderen wordt steeds meer toegepast. In de sondeernormen (hoofdstuk 10) wordt het meten van waterspanning uitgebreid behandeld.

Door de sondeerwaterspanning te meten wordt ook een beter inzicht verkregen in de doorlatendheid van de grond. Dit wordt gedaan met dissipatietesten. Hierbij wordt gemeten hoe lang het duurt dat het overtollige water heeft kunnen afvloeien en de waterdruk zich weer in zijn oorspronkelijke waarde heeft hersteld. De dissipatietijd is afhankelijk van de grondsoort en kan in slecht doorlatende grond oplopen tot een uur. Toch moet de meting bij voorkeur worden doorgezet tot de helft van de aanpassingstijd. Voor doorlatende lagen als zand zal dit geen probleem zijn, omdat de aanpassing vaak in de enkele minuten is voltooid.

- **De geleidbaarheid (conductiviteit)**

Door te sonderen met een conus waarop een anode en een kathode zijn aangebracht, kan de elektrische geleidbaarheid van de grond worden gemeten. Dit kan worden gebruikt voor het berekenen van roestbeschermingen. Ook geeft het een indruk over bijvoorbeeld het verloop van het zoutgehalte van het grondwater over bepaalde diepten. Immers, hoe hoger het zoutgehalte, hoe beter de geleiding. Hiervoor is wel een ijking nodig aan de hand van grondwatermonsters.

- **De geleiding van trillingen (seismische sonderingen)**

Een sondeerconus kan ook worden uitgerust met een gefoon, een apparaat dat trillingen in de grond meet. Door met een voorhamer op

een stalen plaat te slaan die op het maaiveld ligt, kan de tijd worden gemeten die de trilling nodig heeft om de geofoon te bereiken. Hieruit kan de looptijd van de trilling worden afgeleid, waaruit weer de 'elasticiteitsmodulus' van de grond kan worden berekend. Deze E-modulus is belangrijk voor de zogenoemde plaxisberekeningen. Deze metingen zijn zeer gecompliceerd, omdat allerlei achtergrondtrillingen moeten worden geëlimineerd.

- **Pressiometerproeven**

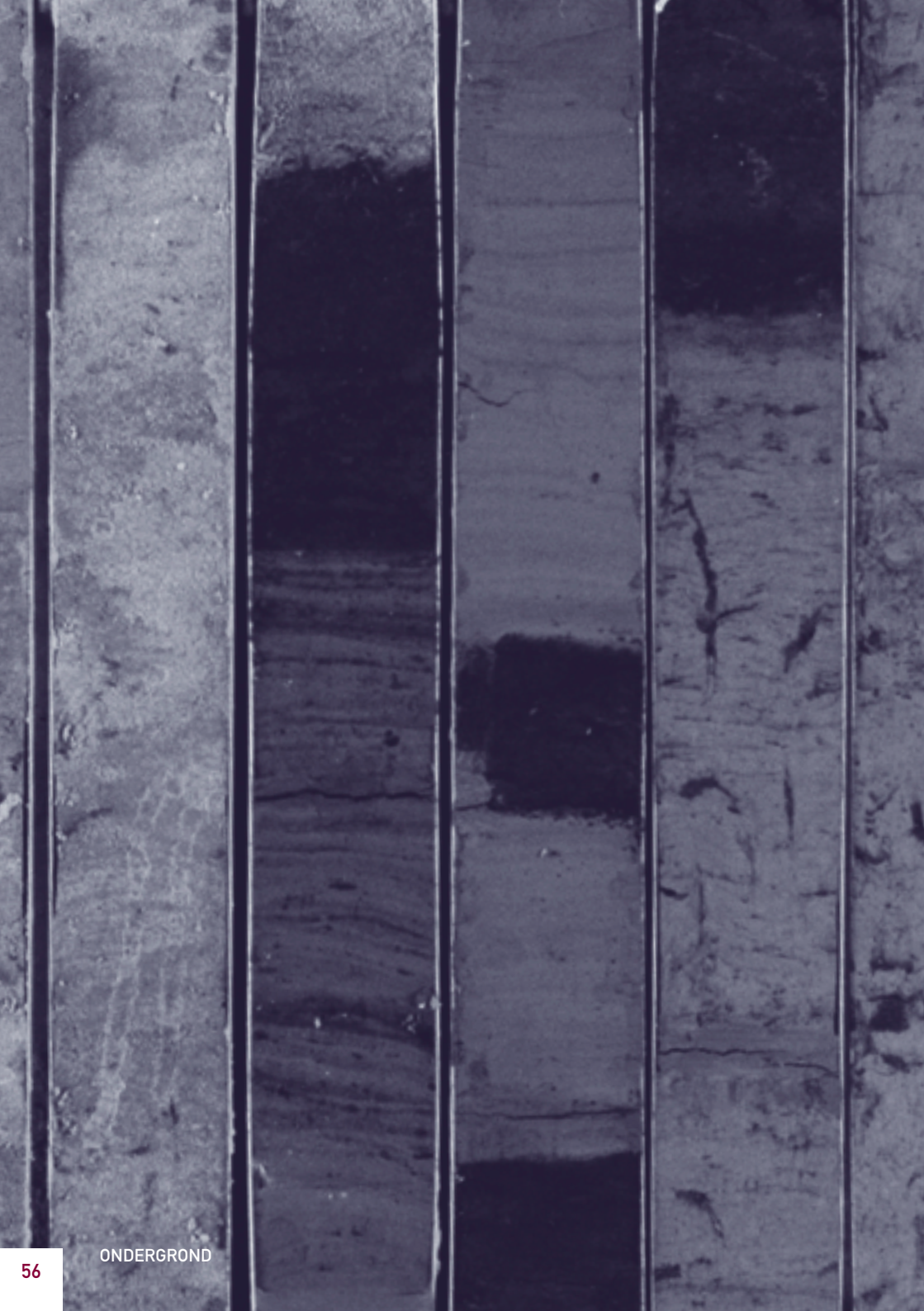
Voor de berekening van grondkerende constructies, bijvoorbeeld wanden van tunnels of kelders, is het soms van belang om de horizontale veerconstante (horizontale beddingconstante) te weten. Hiermee kan bijvoorbeeld de grondweerstand die een damwand of een paal bij een verplaatsing ondervindt worden berekend. In dat geval kan de conus worden uitgerust met een ballon, die op bepaalde diepte met waterdruk kan worden opgeblazen. Uit het drukverloop tijdens het oppersen kan de beddingsconstante worden afgeleid.

- **Milieumetingen**

Sonderingen zijn ook bruikbaar bij milieukundig bodemonderzoek. Een aantal bedrijven heeft de beschikking over wegdrukbaar sondes die bijvoorbeeld elektrische geleidbaarheid, redox-potentiaal, zuurgraad en temperatuur meten. Ook bestaan er sondeertechnieken om snel op grotere diepte een monster te nemen van verontreinigde grond of grondwater, op een manier zonder dat het monster met andere grondlagen in contact komt. Ten slotte zijn er sondeertechnieken die rechtstreeks verontreinigingen van aromatische koolwaterstoffen of vluchtige gechlorideerde koolwaterstoffen kunnen meten.

- **Grondwaterstand**

Het is mogelijk om in het sondeergat de grondwaterstand op te nemen. Dit is echter een zeer onbetrouwbare methode. In slecht doorlatende grond heeft het grondwater niet de tijd om het sondeergat te vullen en in zandgrond zal het sondeergat ter hoogte van de grondwaterspiegel instorten.



5 TERREINONDER- ZOEK: BOREN

Wanneer er na een sondeonderzoek nog vragen openblijven, wordt doorgaans besloten om boringen uit te voeren. Meestal is nog meer informatie nodig over de mechanische eigenschappen van de grond (zoals de samendrukbaarheid en sterkte-eigenschappen) en de stijghoogten van het grondwater in de verschillende lagen. Als de mechanische eigenschappen van de grond moeten worden onderzocht, worden ongeroerde grondmonsters genomen, waarop in een geotechnisch laboratorium proeven kunnen worden gedaan. Voor we hier op ingaan, eerst wat meer over de ontwikkelingen die de boortechniek heeft doorgemaakt.

Geschiedenis van het boren

Tot in de jaren dertig van de vorige eeuw was de grondboring de enige onderzoekstechniek. Hierbij werd gebruik gemaakt van de pulsboormethode. Een puls is een stukje buis, dat aan de onderzijde is afgesloten door een terugslagklep. De puls wordt met behulp van een zware driepoot en een lier op en neer gehaald in de boorbuis. Zo wordt de grond onder uit de boorbuis verwijderd. De lieren dienen ook voor het in en uit de grond trekken van de boorbuizen. Doordat met deze lieren de wrijving tussen grond en boorbuizen slechts in beperkte mate kan worden overwonnen, wordt voor boringen dieper dan vijftien meter meestal één of meerdere malen ‘vertoerd’. Dit houdt in dat telescopisch verder wordt geboord met een volgende streng boorbuizen, door de buitenste boorbuis heen.

- **Stijf of slap**

Het draagvermogen van de grond wordt afgeleid uit de grondsoort en uit waarnemingen van de boorbaas tijdens het boorproces. Hij classificeert de grond naar grondsoort (zand, grond, klei, veen) en geeft daarbij vaak informatie over de consistentie (slap, stijf, los, vast en dergelijke). De genomen monsters waren tot de jaren dertig uitsluitend afkomstig uit de puls en daardoor volledig geroerd. Daarna kwamen wereldwijd monstersteeksystemen beschikbaar voor het nemen van ongeroerde monsters en het uitvoeren van sterkte- en stijfheidsproeven in het laboratorium (samendrukkingsproef, triaxiaalproef, zie hoofdstuk 9).

De Nederlandse boormeester Ackermann kwam met het idee van een dunwandige stalen bus van veertig centimeter lengte en 66 millimeter diameter, die aan de bovenzijde is voorzien van een terugslagklep om te voorkomen dat het monster tijdens het trekken uit de steekbus valt.

• Kous

Het Laboratorium voor Grondmechanica (LGM) ontwikkelde in 1965 het continu boorsysteem. Hiermee is het mogelijk om zonder te boren in één keer vanaf het maaiveld een monster van tien à twintig meter lengte te steken. Dit is mogelijk doordat een zich afwikkellende kous en een boorspoeling wrijving tussen grondmonster en steekapparaat vrijwel geheel voorkomen. Later is het systeem omgedoopt tot Begemannboring, naar dr. Begemann, de drijvende kracht achter deze ontwikkeling.

Hoewel het systeem fantastisch werkt voor niet al te vaste grondlagen, is het nooit tot een wereldwijd (en zelfs breed nationaal) gebruik gekomen. Dat komt deels door octrooien en licenties, maar ook doordat het een ingewikkeld systeem is. Het eist een hoge scholings- en nog hogere ervaringsgraad van het personeel. Ook het fabriceren van de speciale kous is ingewikkeld.

• Hydraulisch

In de jaren zeventig maakten hydraulische pulsboormachines hun opwachting. Hierbij wordt de boorbuis aangedreven door krachtige hydraulische draai- of schud- trek/druktafels. De toepassing van een lier wordt beperkt tot het omhoog halen van de volle puls. Een automatisch hydraulisch slagwerk voorziet in een pulserende beweging van de pulsdraad. 'Vertoeren' is hierdoor nog maar sporadisch nodig, alleen bij boringen dieper dan 30 tot 50 m. Tevens steeg de boorproductie bij pulsboeren van 10 meter per dag naar 20 tot 30 meter per dag. Pulsboringen met continu gestoken ongeroerde monsters verhogen de productie van zes meter per dag naar vijftien meter per dag. En dat terwijl er minder mensen nodig waren. In plaats van drie á vier personen, kan het werk gedaan worden door twee man.

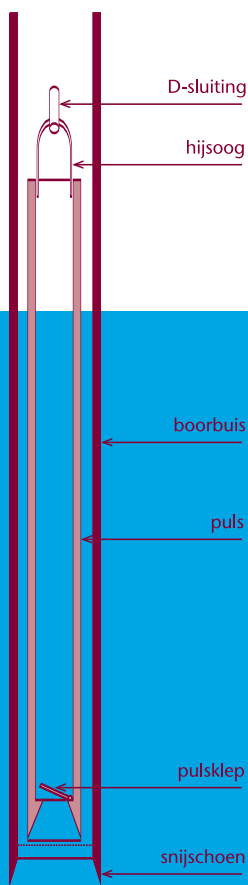
Voor het boren in klei- en veenlagen en voor zandlagen boven de grondwaterstand wordt naast de puls steeds meer gebruik gemaakt van een volle avegaar met een lengte van één à twee meter. Hiermee wordt de grond uit of net onder de boorbuis verwijderd en geclassificeerd. Niettemin wordt een dergelijke boring doorgaans nog steeds pulsboeren genoemd.

Resumerend kan worden opgemerkt, dat er in 75 jaar eigenlijk weinig is veranderd aan de basistechniek van het pulsboeren. De techniek is nog steeds de meest gebruikte boortechniek voor bodemonderzoek. De modernisering betreft voornamelijk de boormachine en daardoor een toename van de boorproductie. Verder is

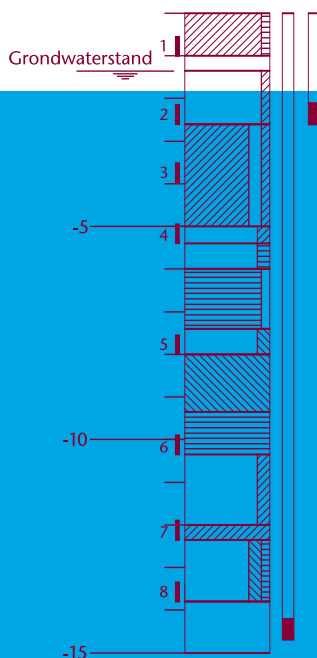
het Ackermann steekapparaat nog steeds het meest gebruikte apparaat voor het nemen van ongeroerde monsters.

Hedendaagse praktijk

Bij een grondboring wordt met een boorstelling een buis in de grond gebracht. Dit gebeurt over het algemeen door de buis goed verticaal op het maaiveld te plaatsen. Vervolgens wordt een lepelboor of een avegaar in de buis gebracht en de grond onder de buis los geboord. De buis wordt gelijktijdig in de grond gedrukt. Als de boor vol is, wordt hij omhoog gehaald en geleegd. Van elke aangetroffen laag wordt een monster in een plastic zakje gedaan. Dit wordt een geroerd monster genoemd.



figuur 5.1: Grondpuls



figuur 5.2: Boorprofiel

Als onder de grondwaterspiegel in zandlagen moet worden geboord, dan lukt dit niet met een avegaar of lepelboor, omdat deze leegloopt. In dat geval wordt een puls gebruikt. Dit is een stalen buis met aan de onderkant een klep. Door de puls (zie figuur 5.1) steeds een stukje op te halen en te laten vallen, vult hij zich met grond. Als hij vol is, wordt hij opgehaald en geleegd. Van de opgeboorde grond wordt een geroerd monster genomen.

Geroerde monsters geven slechts een indruk van de laagopbouw. Daartoe worden ze in het veld en in het laboratorium geclassificeerd. Aan de hand van de benoeming wordt een boorprofiel getekend (zie figuur 5.2).

Uitgelegde boring

Geroerde monsters zijn meestal niet geschikt voor het uitvoeren van laboratoriumproeven. Hiervoor zijn ongeroerde monsters nodig. Deze worden meestal genomen met het steekapparaat van Ackermann (zie figuur 5.3).

Voor het nemen van een ongeroerd monster wordt op de gewenste diepte de boorbuis tot aan de onderkant schoon gepulst. Vervolgens wordt de puls vervangen door het steekapparaat. Hiermee wordt een dunwandige stalen bus met een valgewicht dat aan het steekapparaat zit, onder de boorbuis uit geslagen.

De bus vult zich met grond. Als hij over de vereiste diepte is gezakt (meestal 450 mm), dan wordt hij opgehaald. De boven- en onderzijde van de bus worden goed afgesloten. In het laboratorium wordt het monster uit de bus gedrukt en kunnen er proeven op worden gedaan. Indien nodig kunnen de bussen ook aaneengesloten worden gestoken. Dit wordt dan een Ackermannboring genoemd.

Zoals eerder vermeld, bestaat er ook een manier om een ongeroerd monster over de volle lengte van de boring te nemen (Begemann-boring). Het verkregen continue ongeroerd monster wordt in het veld in stukken gesneden, in PVC-gootjes gelegd en naar het laboratorium vervoerd.

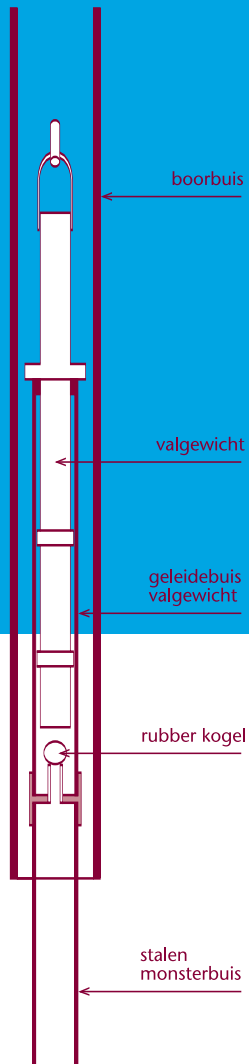
Boorprofiel

Het boorprofiel en de sondeergrafiek geven samen een goed beeld van de bodemopbouw. Omdat voor een project meestal meerdere sonderingen worden gemaakt, kunnen die naast elkaar worden gelegd. De laagopbouw kan worden afgeleid door delen van de grafiek met dezelfde conusweerstand met elkaar te verbinden. Hierdoor ontstaat een geotechnisch lengteprofiel.

Materieel

Voor het uitvoeren van boringen wordt in de praktijk gebruik gemaakt van de techniek van het puls- en/of Ackermannboren, en in wat mindere mate van (holle) avegaarboren. Al deze boringen worden uitgevoerd met hydraulische boormachi-

figuur 5.3: Steekapparaat



nes van zeer uiteenlopend formaat en gewicht. De wat kleinere en eenvoudige machines beschikken over het algemeen niet over een hydraulische draaitafel waar de zwaardere boormachines wel over beschikken. Hiermee wordt meer capaciteit verkregen; met boorbuisdiameters van circa 150 tot 180 mm kunnen dieptes tot circa 100 meter worden bereikt. Voor het werken op goed berijdbare locaties wordt over het algemeen gebruik gemaakt van boorwagens.

Wanneer de terreinomstandigheden dit vragen, worden boorrupsvoertuigen ingezet. Deze kunnen zeer slecht terrein berijden. Net als bij het sonderen geldt als vuistregel dat wanneer men er kan lopen, een rupsvoertuig er zonder aanvullende voorzieningen terecht kan.

De grotere boorvoertuigen hebben over het algemeen een voldoende aantal boorbuizen op de wagen bij zich, en hebben een watertank voor de benodigde hoeveelheid werkwater aan boord.

Wanneer de beschikbare ruimte erg beperkt is, kan gebruik worden gemaakt van een mini-boorrupsvoertuig. De capaciteit van deze kleine machines is doorgaans beperkt. Daardoor is de boordiepte en –diameter veel kleiner dan bij de grotere units.

Te water kan worden geboord vanaf speciaal daartoe ontworpen onderzoekschepen. Ook kunnen losse boorunits of boorvoertuigen worden gebruikt, die gemonteerd worden op een ponton, spudpalenbak of hefeiland.

Wanneer extra hoge eisen worden gesteld aan de monsterkwaliteit, kunnen weg-drukbare monsternamesapparaten worden toegepast, die met sondeerapparaten worden weggedrukt. Dit systeem kan alleen in slappe lagen worden toegepast. Zodra deze systemen een harde laag ontmoeten, is verdere penetratie in het algemeen niet mogelijk.

Daarnaast bestaat er een recent ontwikkelde alternatieve boortechniek, het ‘sonisch boren’. Hierbij wordt een boorbuis onder hoogfrequente trilling gebracht en zo de bodem in gedrukt. Door gebruik te maken van een bijbehorend monsternamesysteem kunnen bodem- en/of grondwatermonsters worden genomen en peilfilters geplaatst. Deze techniek is goed bruikbaar voor milieukundige doeleinden. In de geotechnische bemonstering wordt er veel minder gebruik van gemaakt, omdat de monsterkwaliteit onvoldoende is voor geotechnische proeven. De speciale boorkop kan op diverse wiel- of rupsonderstellen worden gemonteerd en toegepast.

Soms worden verkennende boringen tot grotere diepte gevraagd, bijvoorbeeld voor warmte-koudeopslag. Dit is een manier om het teveel aan (warmte) energie dat in de zomer in een gebouw aanwezig is in de ondergrond op te slaan, om het



in de winter te kunnen gebruiken. Om dergelijke diepe boringen te kunnen doen, beschikt een aantal bedrijven over zogenaamde zuigboormachines. Hiermee kunnen dieptes van honderden meters worden bereikt. Ook hierin bestaan zowel boorwagens als rupsvoertuigen voor de slechtere terreinen.

Geonaut





Pulsboorrupsvoertuig



6 OVERIG TERREIN- ONDERZOEK

Terreinonderzoek is meer dan alleen sonderen en boren. Vaak worden in combinatie met een sondering of boring nog andere onderzoeken uitgevoerd.

Het bepalen van de grondwaterstand

De bodem is meestal uit meerdere lagen opgebouwd. Per laag verschilt de grondsoort, maar ook de grondwaterspanning kan verschillen. Onder het maaiveld ligt de vrije grondwaterspiegel, het zogeheten freatisch vlak. In zandlagen die op een slecht doorlatende laag liggen, kan de grondwaterspiegel afwijken van de freatische grondwaterstand. Het regenwater verzamelt zich dan op de laagst gelegen punten van de slecht doorlatende laag. Dit noemt men de schijnwaterstand. Dit verschijnsel kan tijdens de uitvoering grote problemen geven.

Om de stijghoogten van het grondwater te kennen, kunnen boringen worden afgewerkt met peilbuizen. Een peilbuis is een kunststofbuis, die over de onderste meter geperforeerd is, en dus een soort filter vormt. Rondom deze filter wordt meestal zand gestort om verstopping van de gaatjes te voorkomen.

Het is mogelijk om twee of drie peilbuizen in één boorgat te plaatsen, die elk de waterspanning in een aparte laag aangeven. Om te voorkomen dat de filters allemaal dezelfde stijghoogte aangeven, moet het boorgat tussen de afzonderlijke filters, ter hoogte van de scheidende lagen, met klei worden afgestopt.

Een andere mogelijkheid is het plaatsen van minifilters. Hierbij wordt met een sondeerwagen een dunne peilbuis in de grond gedrukt. Aan de onderkant van de stijgbuis is een filter bevestigd, waardoor het grondwater in de stijgbuis kan stromen. De stijghoogte van het water in de peilbuis kan met een peilklokje worden opgemeten.

Voor metingen over een langere tijd kan een digitale drukopnemer in de peilbuis worden gehangen. In de drukopnemer zit een datalogger, die met een regelmatige tijdsinterval de waterdruk meet. Op deze wijze kan bijvoorbeeld de invloed van het getij op de grondwaterstand worden gemeten.

Peilbuizen zijn minder geschikt om snelle wisselingen in de grondwaterstand

te meten, zeker in slecht doorlatende grond. In dat geval kan het grondwater niet snel genoeg toestromen. Voor deze metingen is een elektrische waterspanningsmeter beter geschikt.

Voor elektrische waterspanningsmeters is een aanzienlijk kleinere hoeveelheid water nodig. Daardoor passen ze zich sneller aan gewijzigde omstandigheden aan, bijvoorbeeld tijdens het ophogen van terreinen. Zo kan worden gemeten of het verantwoord is het terrein nog verder op te hogen, zonder dat de stabiliteit in gevaar komt.

Slagsondering

Een slagsondering wordt in Nederland in hoofdzaak gebruikt in zeer dicht gepakte en grove grond (grind en stenen). In dat geval is de normale sondeertechniek riskant, omdat er dan grote kans bestaat dat de conus afbreekt en er dus een duur stuk gereedschap in de grond achterblijft.

Bij een slagsondering wordt de indringingsweerstand van grond bepaald tegen het loodrecht inheien van een sondeerconus die onderaan een stalen stang is bevestigd. Om wrijvingseffecten zoveel mogelijk te vermijden, is de diameter van de sonde een beetje groter dan de diameter van de stang. In principe worden drie soorten onderscheiden naar zwaarte van het slaggewicht (10, 30 of 50 kg) en de conusdiameter (500, 1000 of 1500 mm²): de lichte, de middelzware en de zware slagsondering. De valhoogte bedraagt 500 mm. Afhankelijk van de zwaarte van de proef en de dichtheid van de ondergrond, kunnen diepten worden bereikt van 10 tot 40 meter. De uitvoering van de proef is beschreven in normblad NEN EN ISO 22476-2:2005.

Tijdens de proef wordt continu het aantal slagen geteld dat nodig is om een zaking van 100 mm te bereiken. Deze N10-waarde wordt genoteerd en in een grafiek tegen de diepte uitgezet. Uit de grafiek kan, samen met boringen, de gelaagdheid van de grond worden afgeleid. Voor lagen die onder de grondwaterspiegel liggen, moet de N10-waarde soms worden gecorrigeerd. Verder kan een relatie worden gelegd tussen de N10-waarde en de relatieve dichtheid, de hoek van inwendige wrijving, de samendrukbaarheid en de draagkracht van funderingspalen (zie ook hoofdstuk 8). Voor de draagkracht van palen sluit de slagsondering niet aan bij de Nederlandse rekenwijze. De overige relaties moeten met enig voorbehoud worden gezien: ze zijn veelal empirisch bepaald en dus niet op enige theorie gestoeld.

Het voordeel van deze proef is het relatief lage risico van stangenbreuk in grove lagen en de continuïteit van de sondering.

Standard Penetration Test (SPT)

In het buitenland wordt veelal de Standard Penetration Test gebruikt om de relatieve dichtheid van zandlagen te bepalen. De uitvoering van de proef is beschreven in normblad NEN EN ISO 22476-3:2005.

Een SPT-proef wordt in een verbuisde grondboring uitgevoerd. Hiertoe wordt het boorgat tot aan de onderkant van de boorbuis schoon gepulst. Daarna wordt het SPT-apparaat in de boorbuis neergelaten. Dit is een monsterbus met een buitendiameter van 51 mm en een binnendiameter van 35 mm, die opengeklapt kan worden (split barrel sampler). De bus is aan een stalen stang bevestigd, die doorloopt tot aan de bovenkant van de boorbuis. Op de stang zit een aambeeld, waarop met een gewicht wordt geslagen (63,5 kg van een hoogte van 760 mm). Hiermee wordt de monsterbus onder de boorbuis uit geheid, waarbij het aantal slagen wordt geteld. Het aantal slagen over de eerste 150 mm wordt niet gebruikt, omdat de grond daar mogelijk geroerd is. Het aantal slagen over de volgende 300 mm is de SPT-waarde. Als meer dan 50 slagen nodig zijn om een zakking van 300 mm te bereiken, dan wordt de zakking bij 50 slagen genoteerd. Na het uitvoeren van de proef wordt de monsterbus uit de boring getrokken en het zand uit de bus gehaald. In grindige grond wordt de monsterbus vervangen door een stalen stift met een punt van 60°. Het is gewenst de proeven om de 0,75 à 1,50 m uit te voeren. Voor zandige lagen met een hoog siltgehalte die onder de grondwater-spiegel liggen en dus slecht doorlatend zijn, moet de SPT-waarde worden gecorrigeerd. Uit de SPT-waarde en de korrelspanning die heerst op de diepte waarop de SPT-waarde is gemeten, wordt met grafieken een hoek van inwendige wrijving of een draagkracht afgeleid. De verschillende onderzoekers pleiten allemaal voor hun aanmerkelijk verschillende afgeleide grootheden.

Het nadeel van deze proef is dat geen continu beeld van de ondergrond ontstaat en dat de proef vrij arbeidsintensief en daarom duur is. De waarde van de afgeleide grootheden is discutabel.

Monitoring

Omdat je nooit zeker weet hoe grond zich na een ingreep zal gedragen, wordt het uitvoeren van een geotechnische constructie vaak begeleid met metingen. Zo kan een ophoging op slappe grond worden gecontroleerd met waterspanningsmetingen en zakkakens (palen met schaalverdeling waarop verzakkingen kunnen worden afgelezen). Met waterspanningsmetingen kan de poriewaterspanning worden gemeten, zodat men inzicht krijgt in de stabiliteit van de randen van de ophoging. Zo wordt duidelijk of nog een volgende ophoogslag kan worden aangebracht of niet. Met het zakkaken kan worden gecontroleerd of het zettingsproces



Monitoring in een spoorwegtunnel

voldoet aan de prognose. Deze manier van werken maakt het mogelijk tijdig in te grijpen indien niet aan de restzettingseis kan worden voldaan.

- **Monitoringplan**

Door middel van boren en sonderen kan allerlei meetapparatuur in de grond worden gebracht. Aan de hand van de metingen kan dan bijvoorbeeld worden beslist of het verantwoord is om bij terreinophogingen een volgende ophoogslag aan te brengen.

- **Waterspanningsmeters**

Tegenwoordig worden meestal elektrische waterspanningsmeters gebruikt, die zowel met een sondeerwagen of door te boren op de gewenste diepte kunnen worden gedrukt. De waterspanningsmeters kunnen elektrisch worden uitgelezen. Dit is bijvoorbeeld van belang bij terreinophogingen. Bij een terreinophoging op een slappe bodem stijgt in eerste instantie de poriewaterspanning, omdat de toegenomen

men druk eerst door het poriewater wordt gedragen. De korrelspanningen nemen daardoor niet toe, waardoor de wrijvingseigenschappen ook niet verbeteren en de grond dus (nog) niet stabiel wordt. In de loop der tijd vloeit het overspannen water weg en neemt de korrelspanning en dus ook de stabiliteit van de grond toe. Door de waterspanning regelmatig te meten, kan worden beoordeeld hoe ver het zettingproces is gevorderd en of het verantwoord is een volgende ophoging aan te brengen.

• Zakbaken en Extensometers

De vordering van het zettingproces kan ook worden gemeten door het plaatsen van zakbaken op het bestaande maaiveld en deze regelmatig te waterpassen. Soms is het gewenst om de zetting van specifieke lagen te kennen. In dat geval worden extensometers geplaatst. Dit zijn ijzeren of glasfiber staven, die met de onderkant in of op de gewenste laag worden vastgezet. Over het bovenliggende deel is de staaf voorzien van een ommanteling, zodat de grond geen kracht (wrijving) op de staaf kan uitoefenen. De laag waarin de extensometer is vastgezet, trekt de staaf naar beneden. Door de bovenzijde van de staaf te waterpassen, wordt de zakking van de laag gemeten.

Een soortgelijke techniek is het in het boorgat plaatsen van een gelede buis waarvan de afzonderlijke delen in elkaar kunnen schuiven. In de buis zijn merken aangebracht, veelal stalen strips. Door een magnetometer in de buis te laten zakken, kan de afstand tussen de strips worden gemeten. Hierdoor kan over de volle hoogte een zettingprofiel worden samengesteld. Deze methode kan vaak worden gecombineerd met hellingmetingen.

• Hellingmeters

Door terreinophogingen of diepe ontgravingen worden dikwijls horizontale vervormingen in de grond veroorzaakt. In de nabijheid van paalfunderingen kan dit leiden tot horizontale druk op de palen, waardoor deze kunnen breken. De mate van vervorming kan met een hellingmeter worden geregistreerd. Hiertoe wordt een kunststofbuis in de grond gebracht. Dit kan zowel met een sondeerwagen als door middel van een boring. Vervolgens wordt een nulmeting uitgevoerd door een hellingmeter in de buis te laten zakken en op regelmatige afstand, bijvoorbeeld per halve meter, de helling te meten. De volgende metingen die in de loop der tijd worden gedaan, worden vergeleken met de nulmeting, waardoor de uitbuiging van de hellingmeterbuis bekend is.



7 OPZET VAN EEN BODEMONDERZOEK

Tot in de jaren dertig van de vorige eeuw was de grondboring de enige onderzoekstechniek. Hierbij werd gebruik gemaakt van de pulsboormethode. Zoals beschreven in hoofdstuk 4 wordt tegenwoordig in Nederland meestal eerst de sondeer-methode gebruikt. Deze methode is veel sneller en goedkoper dan boren. Bovendien laat de grond het in Nederland gelukkig vrijwel altijd toe om met sonderen de gewenste diepte van twintig tot veertig meter (in uitzonderlijke gevallen zestig meter) te bereiken.

Om meer gegevens over de grond te verkrijgen, kan het sondeeronderzoek worden aangevuld met verkenningss boringen. Andere onderzoekstechnieken, die vaak zijn gekoppeld aan verkenningss boringen worden in Nederland alleen voor bijzondere projecten toegepast.

Onderzoek voor een funderingsadvies

Of het nu gaat om een woning, een kantoor, een kunstwerk of om een brug, altijd zal een funderingsadvies nodig zijn. Hoe zorgt een bodemonderzoeker er nu voor dat men tijdens de bouw niet voor verrassingen komt te staan?

Allereerst is het belangrijk om het gebouwoppervlak ‘in te sluiten’. Dit kan het best worden gedaan door sonderingen te plaatsen op de hoekpunten en vervolgens op de gebouwomtrek om de 25 m. Daarna wordt het hele gebouwoppervlak ‘gevuld’ met sonderingen, zodanig dat de onderlinge afstanden in alle richtingen maximaal 25 m bedragen. Er zijn echter gebieden in Nederland waarvan bekend is dat de grondsamenstelling sterk wisselt. Daar is het dan gebruikelijk om sondeer-afstanden van 15 of 20 m aan te houden. In alle gevallen kan het nodig zijn om bij gevonden grote verschillen tussen naburige sonderingen extra sonderingen te maken om het overgangsgebied te bepalen. Dit is echter meestal een constatering achteraf, na interpretatie van de eerste sondeerresultaten.

De sondeerdiepte hangt af van de funderingswijze: op staal of op palen. Voor een fundering op staal kan met 10 à 15 m worden volstaan, voor een fundering op palen is een sondeerdiepte tot ten minste 5 m onder de paalpunt vereist.

Om een beter inzicht te krijgen in de samenstelling van de diverse grondlagen,

is het verstandig om bij alle sonderingen ook de plaatselijke wrijvingsweerstand te meten. De praktijk leert namelijk dat als dit bij slechts enkele sonderingen wordt gedaan, het meestal net niet gebeurt bij de sonderingen waarvan men achteraf graag over deze informatie had willen beschikken. De kosten voor het meten van de wrijving zijn zo gering, dat men het hierom niet hoeft te laten.

Het minimaal vereiste bodemonderzoek is in NEN 6740, artikel 8: Eigenschappen van de grond, beschreven.

Onderzoek voor grotere bouwwerken

Voor grotere bouwwerken zoals wegen, spoorlijnen, dijken en uitbreidingsplannen is een wat minder intensief bodemonderzoek nodig. Hierbij kan men zich voor een eerste aanpak beperken tot een onderlinge sondeerafstand van 100 m. Voor de kunstwerken in dergelijke projecten is uiteraard een intensiever bodemonderzoek nodig dan voor de aarden baan.

De sonderingen moeten tot net in het diepe zand reiken, met een minimum sonderdiepte van tien meter. Aan de hand van de sondeerresultaten kan vervolgens worden bekeken waar er eventueel geboord moet worden. Bij voorkeur kiest men daarvoor karakteristieke sonderingen. Als tijdens het sonderen ook de plaatselijke wrijving is gemeten, kan een correlatie worden verkregen tussen boringen en sonderingen. Elke sondering kan dan als het ware tot boring worden gepromoveerd. Voor deze 'promotie' is wel een hoogwaardige sondering vereist (bij zeer slappe lagen klasse 1, anders tenminste klasse 2). In hoofdstuk 10 wordt hier verder op ingegaan.

Voor een meer verfijnde grondsoorteninterpretatie is het raadzaam om een aantal sonderingen met waterspanningsmeting uit te voeren. Door middel van dissipatieproeven (zie hoofdstuk 4) kan een indruk worden verkregen van de doorlatendheid van klei- en veenlagen, dit met het oog op het zettingsverloop. Hiervoor wordt de sondering op vooraf afgesproken diepten onderbroken. Tijdens de onderbreking wordt de tijd gemeten die nodig is tot de waterspanning weer zijn normale waarde heeft bereikt.

Voor onderzoek naar de stijghoogte van het grondwater in de diverse lagen zijn veelal diepe en freatische peilbuizen (waarmee de grondwaterspiegel kan worden gemeten) nodig. Bij aanwezigheid van slappe samendrukbare lagen moet dat nog worden aangevuld met waterspanningsmeters. Hierdoor kan het verloop van de stijghoogte met de diepte worden vastgesteld. Voor een éénmalige, snelle meting van de stijghoogte in een zandlaag is de eerdergenoemde dissipatieproef eveneens bruikbaar.

Onderzoeksplan

Een bouwput in de binnenstad of een kademuur voor zeeschepen vergt een andere aanpak dan een woning midden in de polder. Daarom is het belangrijk om niet meteen te beginnen met boren, maar eerst een gedegen onderzoeksplan op te stellen. De omvang is afhankelijk van de grootte en ingewikkeldheid van de constructie. In CUR publicatie 127-2003-7 zijn richtlijnen opgenomen voor de hoeveelheid en soort van bodemonderzoek (zie tabel 7.1). Het is belangrijk dat bij het opstellen van het onderzoeksplan een geotechnisch adviseur is betrokken.

Type project	Hart op hart afstand		
	Sonderingen	Boringen	In situ proef
Grondkerende constructies	25 m	75 m	75 m
Lijninfrastructuur	100 m	400 m	250 m
Bouwrijp maken	50 m	200 m	-

Tabel 7.1: Aanbevolen minimale hoeveelheid bodemonderzoek.

Het uitvoeren van boringen met ongeroerde monsters en het plaatsen van peilbuizen verhoogt de waarde van het bodemonderzoek, zeker voor meer gecompliceerde constructies. Niet alleen krijgt men beter inzicht in de bodemopbouw en de grondwaterstanden, ook worden meer gegevens bekend over de mechanische eigenschappen van de lagen, zoals de samendrukbaarheid en sterkteparameters.



8 GROND- MECHANICA

Grond bestaat in principe uit drie of vier materialen, namelijk korrels, water en lucht. Soms wordt er ook organisch materiaal (veen en humus) toe gerekend, dat meestal niet korrelig is. De grootte van de korrels bepaalt over wat voor soort grond we spreken. In hoofdstuk 2 zijn de grondsoorten beschreven die het meest in Nederland voorkomen. Alle korrels bij elkaar vormen het korrelskelet. De ruimten tussen de korrels worden de poriën genoemd. Deze zijn onder natuurlijke omstandigheden gevuld met lucht en/of water. Het gewicht van de grond (volumieke massa) is afhankelijk van de korrels en van het porie-, water- en luchtgehalte van de grond. Hoewel al deze onderdelen de eigenschappen van de grond beïnvloeden, is de aard van de korrel het meest bepalend.

Van nature komen allerlei mengvormen voor van de verschillende componenten. Daarom laten de eigenschappen van grond zich nooit exact omschrijven, in tegenstelling tot bijvoorbeeld beton of staal. De meetbare grondeigenschappen kunnen sterk variëren. Dit bemoeilijkt een voorspelling van het gedrag van de grond bij een wijziging van de omstandigheden. Opdrachtgevers eisen echter vaak een hoge nauwkeurigheid van voorspellingen. Rekentechnisch kan die wel worden bereikt, maar vanwege die onvoorspelbaarheid is de realiteitswaarde ervan vaak niet al te groot. De grootte van de korrels, de aard van het materiaal en het aandeel van organisch materiaal hebben een grote invloed op de volumieke massa. De afzonderlijke componenten hebben onder natuurlijke omstandigheden ongeveer de volgende volumieke massa:

Grondsoort	Volumieke massa [kg/m ³]
Zand (nat)	1.900 à 2.100
Zand (vochtig)	1.800 à 1.900
Klei	1.400 à 1.600
Veen	1.000 à 1.200
Water	1.000

In de praktijk wordt meestal gewerkt met het volumegewicht (kN/m³).

Grondspanningen

De verschillende onderdelen van grond (korrels, water en lucht) oefenen krachten op elkaar uit. Daardoor ontstaan spanningen, die iets zeggen over de stabiliteit van de grond. Zo kan de luchtdruk in de grond lager of hoger zijn dan de luchtdruk bovengronds, omdat de grondwaterspiegel juist is gezakt of gestegen. Hetzelfde geldt voor de waterspanning. En ook de korrels oefenen krachten op elkaar uit, zoals wrijvingskracht en drukkracht als bijvoorbeeld een terrein is opgehoogd.

De grondspanning op een bepaalde diepte is de som van het gewicht van de korrels in de hoger gelegen lagen, plus het gewicht van het water dat deze lagen bevat.

Iets nauwkeuriger geformuleerd: de grondspanning is de verticale druk die de grond (het totaal van korrels, water, organisch materiaal en lucht) op een bepaalde diepte onder het oppervlak uitoefent (kN/m^2). Ze wordt berekend door het volumieke gewicht van de afzonderlijke lagen te vermenigvuldigen met de laagdikte en de gewichten bij elkaar te tellen (zie figuur 8.2).

• Korrelspanning

Als de grond alleen uit korrels zou bestaan, worden in de contactvlakken tussen de korrels krachten overgebracht. Als de korrels in rust zijn, dan moet voor elke korrel gelden dat de erop werkende krachten in evenwicht zijn.

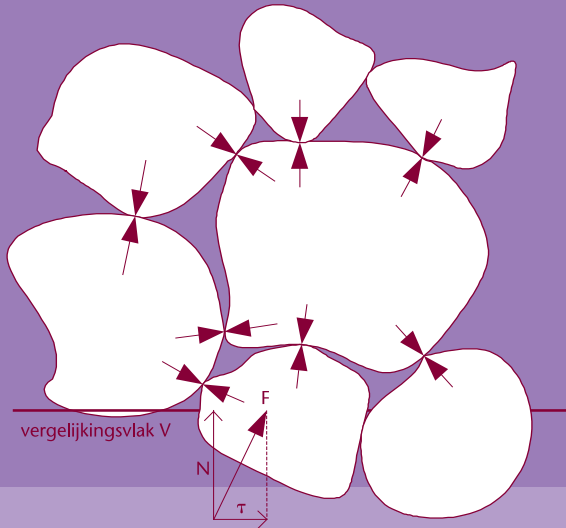
In figuur 8.1 zijn de krachten aangegeven zoals deze op de korrels werken. De contactvlakken tussen de korrels zijn klein, maar wisselend van grootte. Ook de richting waarin de krachtjes werken is niet bekend. Daardoor is het niet mogelijk om de spanningen in de afzonderlijke vlakjes te berekenen. Er moet daarom een schematisering plaatsvinden om berekeningen te kunnen maken.

Dit wordt gedaan door een gemiddelde spanning op een horizontaal vlak te berekenen. In de figuur is dat weergegeven als het vergelijkingsvlak V. Vlak V is zeer groot in vergelijking met het totale oppervlak van de raakvlakjes.

Ervan uitgaande dat de beschouwde moot grond in evenwicht is (niet verplaatst), kunnen de contactkrachtjes worden ontbonden in horizontale en verticale krachten. Schuifkrachten (τ) werken in horizontale richting en normaalkrachten (N) in verticale richting. In figuur 8.1 zijn de krachten die de korrels op elkaar uitoefenen schematisch aangegeven.

Wanneer nu gerekend wordt met de gemiddelde spanningen, zoals die op een zeker vlak V werken, dan kunnen de krachten die in allerlei richtingen werken, worden ontbonden in normaalkrachten (loodrecht op dit vlak) en schuifkrachten (evenwijdig aan dit vlak). Vlak V is groot in verhouding tot de contactvlakjes en de korreldiameter. De formules om de grondspanning te kunnen berekenen, staan in het kader.

Figuur 8.1: Gemiddelde korrelspanning



Formules

De gemiddelde korrelspanningen worden gedefinieerd als:

$$\sigma' = \Sigma N/A$$

$$\tau' = \Sigma \tau N/A$$

waarin:

σ' = normaalspanning; meestal aangeduid als effectieve spanning [kPa]

τ' = schuifspanning [kPa]

N = krachten tussen de korrels [kN]

A = oppervlak [m²]

Het accentteken in de notatie geeft aan dat de spanningen betrekking hebben op de krachten tussen de korrels onderling. Dit wordt de effectieve spanning genoemd. Omdat men in de grondmechanica voornamelijk te maken heeft met drukspanningen worden deze als positief aangeduid. Trekspanningen krijgen een negatief teken.

• Waterspanning

In het voorgaande kader is aangenomen dat de waterspanning recht evenredig met de diepe toeneemt (hydrostatisch is). Dit is niet altijd het geval. In slecht waterdoorlatende gronden wijkt de druk vaak af van het hydrostatisch verloop. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat door een plotseling opgebrachte terreinbelasting de belasting in slecht doorlatende lagen geheel of gedeeltelijk door het poriewater wordt gedragen.

In figuur 8.3 is het waterspanningsverloop schematisch weergegeven voor zowel overspanning als onderspanning. In beide gevallen zal er sprake zijn van (geringe) grondwaterstromingen.

Wateroverspanning in samendrukbare grondlagen wordt vaak veroorzaakt door een belastingsverhoging op de ondergrond. Dit is bijvoorbeeld het geval bij zandophogingen ten behoeve van het bouwrijp maken van terreinen of bij de aanleg van weglichamen of dijken.

Aan de hand van de verticale gronddrukken kunnen de belangrijkste berekeningen worden gemaakt voor grondkerende constructies en het opbarsten van bouwputbodems.

Het principe van de splitsing van de grondspanning in korrelspanning en waterspanning is de basis van de grondmechanica.

Voorschriften

Om te mogen bouwen moet de opdrachtgever een bouwvergunning aanvragen. Voor toestemming moet hij met tekeningen en berekeningen aantonen, dat zijn ontwerp voldoet aan de veiligheidseisen, zoals deze in het Bouwbesluit en de TGB 1990 (Technische Grondslagen Bouwvoorschriften 1990) zijn vastgelegd. De TGB omvat, naast normen met de algemene basiseisen, de belastingen, de vervormingen en een aantal materiaalgebonden normen, ook normen op het gebied van de geotechniek. In deze laatste normen zijn de prestatie-eisen voor de funderingen van bouwwerken en andere geotechnische constructies omschreven. Om te zorgen dat iedereen de berekeningen op eenzelfde manier uitvoert, zijn de rekenmethoden in geotechnische normbladen beschreven (zie hoofdstuk 10).

Het geotechnische normenstelsel is zodanig opgezet, dat kan worden getoetst of een ontwerp aan de prestatie-eisen voldoet.

In NEN 6740 en NEN 6702 worden de basiseisen en belastingen beschreven, zoals materiaalfactoren, veiligheidsklasse, grenstoestanden, bezwijkmechanismen en benodigd bodemonderzoek. De hierin gebruikte benamingen, definities en notaties zullen hierna worden gebruikt.

Een berekening

Grondspanning = Korrelspanning + Waterspanning.

In formulevorm: $\sigma_{gr} = \sigma_k + \sigma_w$

In vochtig zand (met een volumieke massa van 18 kN/m^3) is op drie meter diepte de grondspanning $3 \times 18 = 54 \text{ kN/m}^2$. Vier meter dieper, op zeven meter onder het maaiveld, in een kleilaag met een volumieke massa van 16 kN/m^3 , bedraagt de grondspanning:

$$3 \times 18 + 4 \times 16 = 54 + 64 = 118 \text{ kN/m}^2$$

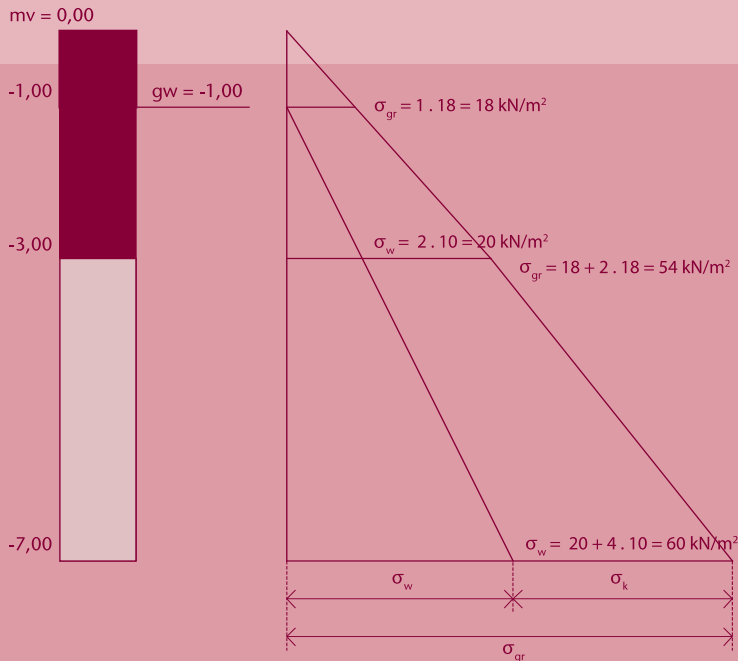
Als de grondwaterstand op één meter onder het maaiveld ligt, dan bedraagt de waterspanning aan de onderzijde van de kleilaag:

$$(7 - 1) \times 10 = 60 \text{ kN/m}^2.$$

De korrelspanning (σ_k) op zeven meter onder het maaiveld wordt dan:

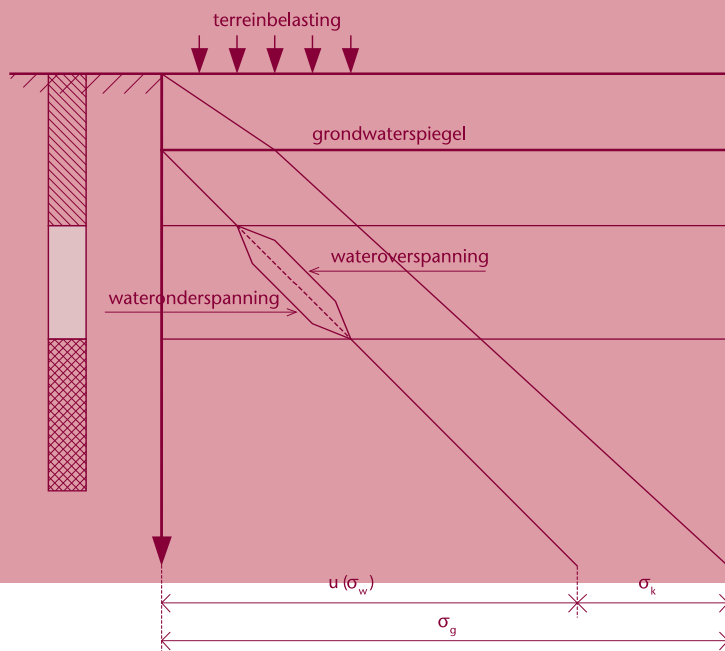
$$\sigma_k = \sigma_g - \sigma_w = 118 - 60 = 58 \text{ kN/m}^2.$$

Omdat het zand in de eerste meter geen water bevat, is de korrelspanning op een meter onder het maaiveld gelijk aan de grondspanning.



Figuur 8.2: Schema grond-, korrel-, en waterspanningen

Figuur 8.3: Schema grond-, korrel-, en waterspanningen met over- of onderspannen water.



Voor trekpalen en horizontaal belaste palen is tot op heden geen norm. In CUR-rapport 2001-4 zijn echter wel richtlijnen voor het ontwerpen van trekpalen gegeven.

NEN 6743 'Berekeningsmethode voor funderingen op palen', is van toepassing op axiaal (= in de lengterichting van de paal) op druk belaste palen. Aan de hand van dit normblad kunnen paalfunderingen worden ontworpen en worden getoetst aan de eisen van het Bouwbesluit.

NEN 6744 'Berekeningsmethode voor funderingen op staal', geeft regels voor de bepaling van de draagkracht en de zakking van funderingen op staal ten behoeve van de toetsing aan de uiterste- en de bruikbaarheidstoestanden.

Zettingen

In het westelijke deel van Nederland komen veel zachte grondsoorten voor als klei en veen. Deze grondsoorten hebben als eigenschap dat ze onder invloed van

belastingen samengedrukt worden. Dit heeft maaiveldzakking tot gevolg. Zo is bekend dat veenpolders enkele millimeters per jaar zakken, mede als gevolg van onderbemalingen. Dit proces gaat alsmaar door. Ook wegen en dijken die op zachte gronden liggen, ondergaan zettingen. De zettingsnelheid is vooral groot vlak na de aanleg van ophogingen voor dijken of wegen of voor het bouwrijp maken van terreinen. In het eerste jaar na ophoging kan deze in extreme gevallen één tot twee meter bedragen. Na verloop van tijd nemen de zettingen af en ontstaat uiteindelijk een min of meer stabiele situatie.

Het zettingtempo neemt in de loop der tijd af, doordat het poriënwater de spanningsverhoging direct na het aanbrengen van een belasting opneemt. Het water kan maar langzaam wegstromen door de slechte waterdoorlatendheid van samenhangende grond. Heel langzaam wordt de belasting overgenomen door de korrels. Als de waterspanning zijn vroegere waarde heeft bereikt, is het zettingproces vrijwel afgelopen. Dit proces wordt de primaire zetting genoemd. De praktijk leert echter dat de zettingen ook daarna nog doorgaan. Dit komt vermoedelijk door het afstromen van water dat chemisch aan de grondkorrels is gebonden. Dit worden de secundaire of seculaire zettingen genoemd.

De duur van het zettingproces is, behalve van de waterdoorlatendheid, ook afhankelijk van de weg die het overspannen grondwater moet afleggen, in feite de laagdikte. De consolidatietijd is evenredig met het kwadraat van de af te leggen weg. Om de weg te bekorten kan verticale drainage worden aangebracht. Door de weg te halveren, gaat het zettingproces dus vier maal zo snel.

Om van tevoren inzicht te krijgen in het zettinggedrag van een gebied dat opgehoogd moet worden, kunnen zettingberekeningen worden uitgevoerd. De berekeningen zijn te maken aan de hand van ervaringscijfers of in het laboratorium uitgevoerde samendrukkingsproeven. Uit zettingsberekeningen en de daaruit afgeleide zettingprognose kan worden afgeleid wanneer met bouwen kan worden begonnen of wanneer de aansluitingen van de nutsbedrijven (gas, water, kabels) kunnen worden gemaakt.

Fundering op staal

Voor de fundering van een gebouw zal in het algemeen in eerste instantie aan een fundering op staal worden gedacht. Onder een staalfundering wordt de belasting van een bouwwerk via een plaat, een strook of een poer op de ondergrond overgebracht.

Om een zettingvrije fundering te krijgen, mogen onder de fundering geen samendrukbare lagen voorkomen. Als tussen de onderkant van de fundering en de bovenkant van de draagkrachtige lagen nog samendrukbaar materiaal aanwezig is, dan wordt dit meestal ontgraven en vervangen door verdicht zand of ander slecht

De draagkracht van een fundering op staal wordt ontleend aan de wrijving langs de glijvlakken in de grond onder de fundering, in het geval dat de fundering in de grond wordt gedrukt en bezwijkt.

De draagkracht van een fundering op staal wordt conform NEN 6744 berekend.

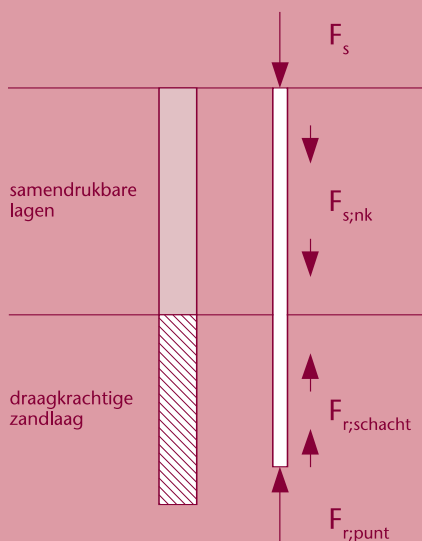
The diagram illustrates a foundation element of width B subjected to a vertical load $F_{s;v;d}$. The foundation is embedded in the ground to a depth d . The soil surface is subjected to a uniform surcharge $q = \gamma \cdot d$, where γ is the soil unit weight. The failure mechanism is shown as a curved slip surface (labeled 'schuifvlak') extending to a depth t_e below the foundation base. The diagram also indicates the ground level and the foundation's position relative to the ground surface.

d = gronddekking
 t_e = invloedsdiepte = 1,5 B

Als een fundering op staal niet mogelijk of wenselijk is, dan wordt meestal een paalfundering toegepast. Met een paalfundering worden de belastingen naar dieper gelegen draagkrachtige lagen overgebracht.

Als de lengte van een funderingselement groter is dan vijf maal de kleinste dwarsafmeting, dan mag men van een paalfundering spreken. De berekening van de draagkracht van een funderingspaal wordt in Nederland gedaan aan de hand van sonderingen. Een sondering wordt daarbij beschouwd als een kleine proefpaal.

Figuur 8.6: Krachten op een paal.



F_s = de belasting op de paalkop, bestaande uit statische belasting (bv. eigen gewicht) en dynamische belasting (bv. wind).

$F_{s, \text{nk}}$ = de door zakkende lagen op de paalschacht uitgeoefend belasting, de zgn. negatieve kleef.

$F_{r, \text{schacht}}$ = de tussen de neerwaartwaarts verplaatsende en de omringende grondontwikkelde wrijvingskracht, de zgn. positieve kleef.

$F_{r, \text{punt}}$ = de weerstand van de paalpunt in de draagkrachtige laag.

De pijltjes geven de bewegingsrichting van de grond ten opzichte van de paal weer.

Op een funderingspaal die in de lengterichting (axiaal) op druk wordt belast, werken tal van krachten, zoals uitgebeeld in figuur 8.6:

De op de paalkop toelaatbare belasting is de som van de hiervoor genoemd krachten.

Grondkerende constructies

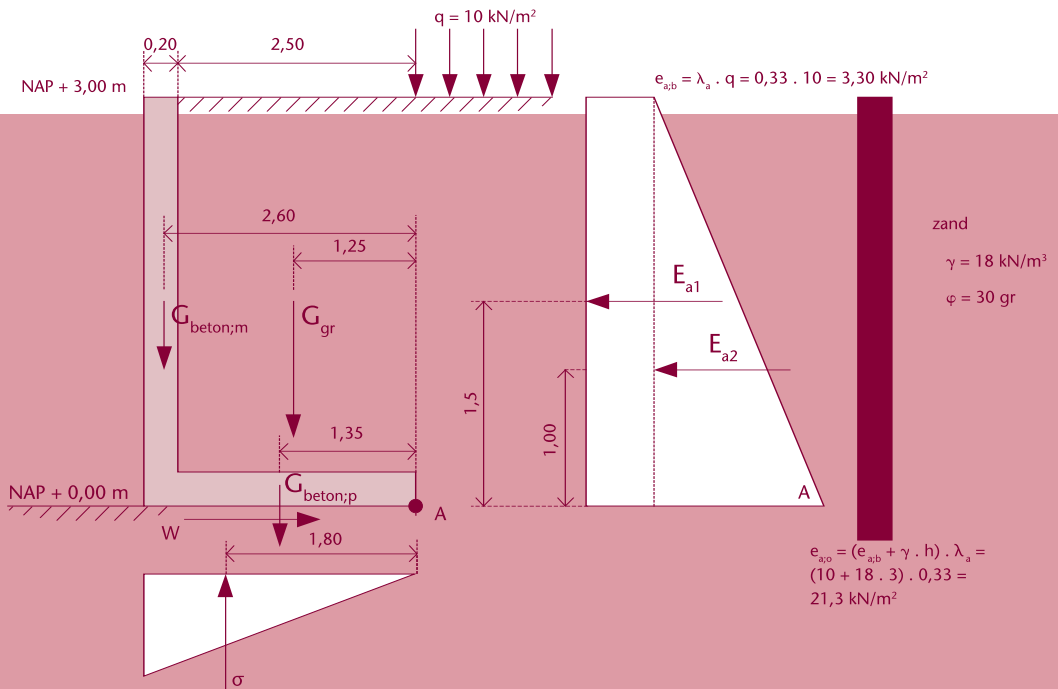
Grondkerende constructies worden voornamelijk door horizontale (= zijwaartse) druk belast. Als dit waterdruk is, dan is dat geen moeilijke som: de verticale en de horizontale waterdruk zijn immers aan elkaar gelijk. Bij grond is dat anders, hier is de horizontale en de verticale korrelspanning niet aan elkaar gelijk. Dat is te zien als grond wordt uitgestort. Dit loopt niet weg zoals water, maar er ontstaat een hoop. De hoek waaronder het talud van de hoop komt te liggen, wordt de hoek van het natuurlijk talud (ook wel hoek van inwendige wrijving) genoemd. Deze kan in het laboratorium met triaxiaalproeven (zie hoofdstuk 9) worden bepaald. Uit de hoek van inwendige wrijving kunnen de horizontale korreldrukcoëfficiën-

ten worden berekend. Het maakt hierbij verschil of de grond tegen een constructie drukt (bijvoorbeeld de gronddruk tegen een wand), dit is de actieve druk, of dat de wand probeert om de grond opzij te drukken, de passieve gronddruk.

• Keermuren

Een bijzondere vorm van een keermuur is een L-muur. Bij een gewichtsmuur wordt het evenwicht verzorgd door de muur een hoog eigen gewicht te geven en wordt er dus veel beton gebruikt. Bij een L-muur ligt er grond op het horizontale deel van de muur. Deze grond drukt op de bodemplaat en heeft dan hetzelfde effect als een hoog eigen gewicht. Door de horizontale gronddruk op de wand van de L-muur wordt een buigend moment veroorzaakt, dat door middel van wapening kan worden gecompenseerd. Om te blijven staan, moet een kerende constructie aan drie voorwaarden voldoen:

Ten eerste moet er een horizontaal evenwicht zijn, dat wil zeggen dat de horizontale gronddruk moet worden gecompenseerd door de wrijving tussen de bodemplaat en de grond. In mechanische termen: som H moet nul zijn ($\Sigma H = 0$).



Figuur 8.7: Voorbeeld krachten spel op een L-muur

Op de tweede plaats mag de wand niet kantelen, dat wil zeggen dat alle drukken die damwand willen laten kantelen moeten worden gecompenseerd door de funderingsdruk tegen de onderkant van de bodemplaat. In mechanische termen: som M moet nul zijn ($\Sigma M = 0$).

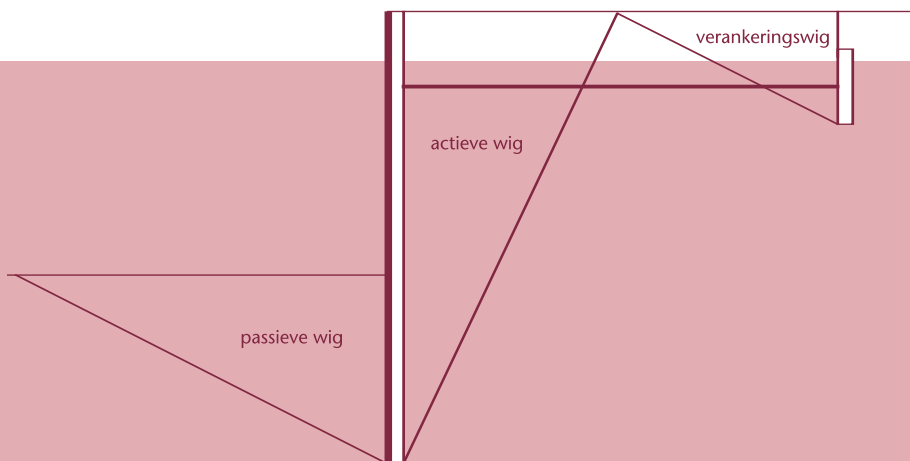
Ten slotte moet er ook in verticale zin evenwicht zijn, omdat de wand anders in de grond zou zakken ($\Sigma V = 0$)

In figuur 8.7 is het krachterspel uitgebeeld.

• Damwanden

Bij keerwanden en L-muren wordt het grondkerende vermogen geleverd door het eigen gewicht van de muur, het gewicht van de grond en de wrijving tussen de grond en het grondvlak. Damwanden worden diep onder het aanlegniveau van de muur in de grond gebracht. Om te bezwijken moet grond worden verplaatst (passieve weerstand).

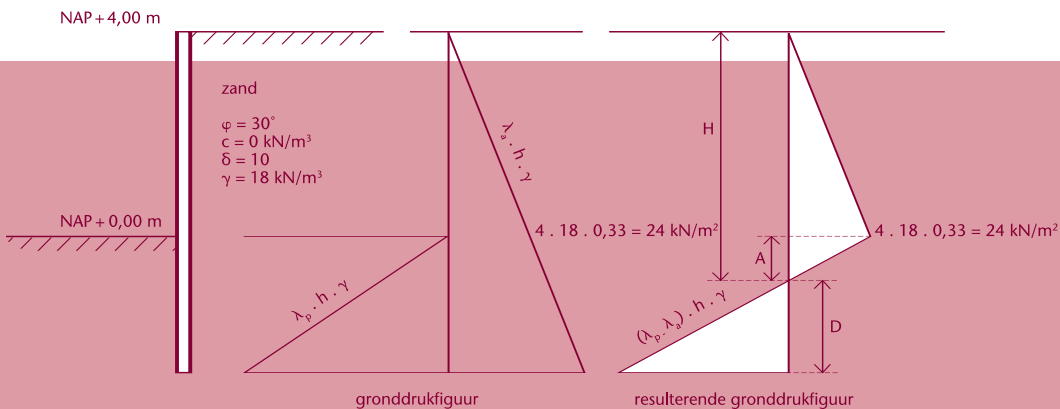
Als de stabiliteit van een damwand alleen aan de grondweerstand wordt ontleend, dan spreekt men van een vrijstaande damwand. Het is ook mogelijk een steunpunt aan te brengen, bijvoorbeeld een verankering of een stempeling. Dit



figuur 8.8: grondwigen voor een damwandconstructie

geeft een kortere en lichtere damwand. In dat geval spreekt men van een enkelvoudig verankerde damwand. Bij grote kerende hoogte kan het nodig zijn om op meerdere niveaus een steunpunt aan te brengen. In dat geval wordt van een meervoudig gestempelde damwand gesproken.

Vergeleken met een keermuur is een damwandconstructie vrij slap en geeft ook vaak een beetje mee. Zo'n verplaatsing heeft gevolgen voor de verdeling van de korreldruk. Vroeger werd in Nederland meestal de rekenmethode Blum gebruikt. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de korreldruk actief of passief is, al naar gelang de bewegingsrichting. Met deze methode kunnen echter geen verplaatsingen (uitbuiging) worden berekend. Van de actieve druk (tegen de damwand aan) naar de passieve druk (van de damwand af) volgt de horizontale gronddrukcoëfficiënt een overgangstraject. Voor het ontwikkelen van de actieve weerstand is weinig verplaatsing nodig. Voor het ontwikkelen van de passieve weerstand is ongeveer tien keer zoveel verplaatsing nodig. Het verloop van het overgangstraject wordt beschreven door middel van de beddingsconstante. Bij een hoge beddingsconstante, zoals bijvoorbeeld in zand, is weinig verplaatsing nodig, terwijl in slappe grond met een lage beddingsconstante, vrij veel verplaatsing nodig is.



figuur 8.9: Geometrie van de vrijstaande damwand

Om de verplaatsing te kunnen berekenen is de elasto-plastische methode ontwikkeld. Hierbij wordt rekening gehouden met de vervorming van de damwand. Deze berekeningen verlopen iteratief (heen en weer rekenen) en moeten dus met een computer worden uitgevoerd. Elasto-plastische berekeningen leiden dus in principe tot een wat zwaardere en langere damwand dan wanneer volgens methode Blum wordt berekend.

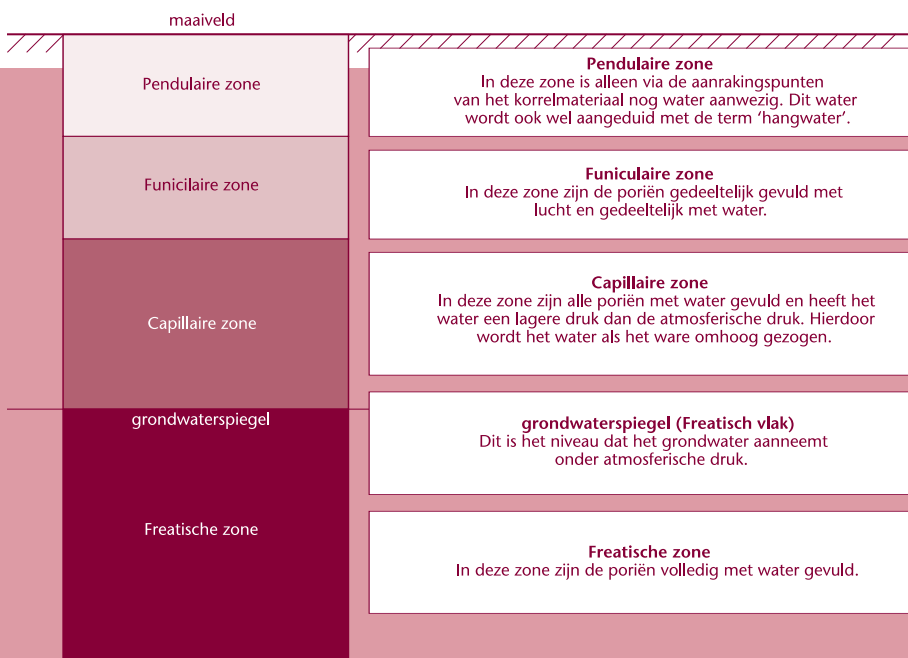
Grondwater

• Grondwaterregimes

De ruimte tussen de grondkorrels is lang niet altijd geheel gevuld met water (met water verzadigd). In de hydrologische opbouw worden vier zones onderscheiden, zoals te zien is in figuur 8.10.

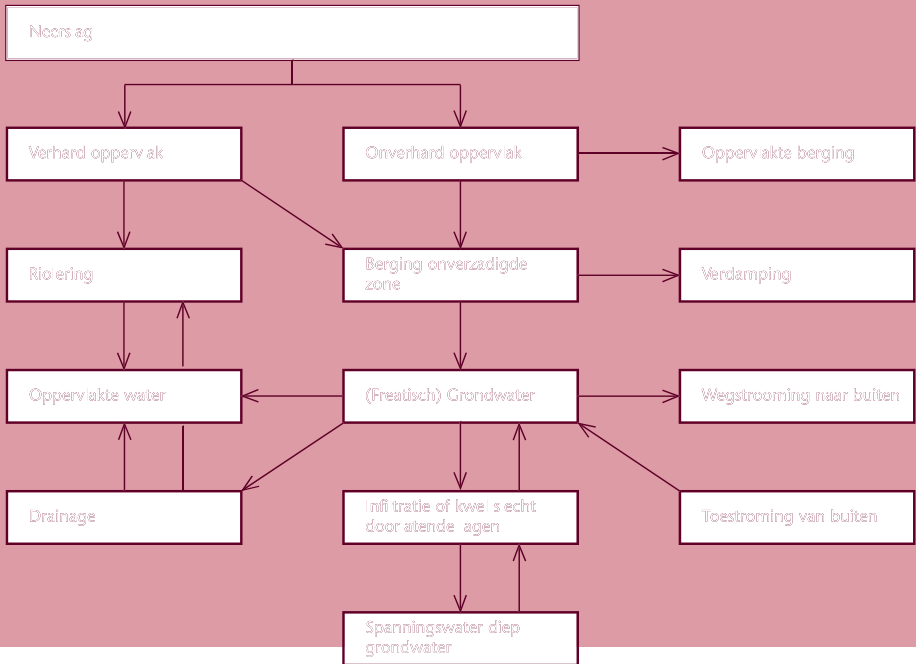
• Factoren die de grondwaterstand bepalen

De grondwaterstand wordt beïnvloed door de (effectieve) neerslag en de afvoermogelijkheden. Vooral in stedelijke gebieden is het hydrologische systeem complex. Met name de lage ligging van Nederland speelt hierbij een belangrijke rol.



figuur 8.10: Indeling grondwaterregimes

figuur 8.11: Grondwaterbalans



In bovenstaand schema is het verband weergegeven tussen de factoren die op de grondwaterstand van invloed zijn. Het schema laat zien dat de grondwaterstand wordt bepaald door het evenwicht in de waterstromen. Hoe hard regent het? Hoe functioneert de riolering? Hoeveel verhard en onverhard oppervlakte is er, enzovoort. De grondwaterstand is niet constant maar fluctueert in de tijd. Als de toevoer van water groter is dan de afvoer, dan zal de waterstand stijgen. Is het omgekeerde het geval, dan daalt de grondwaterspiegel. In grote lijnen is dit evenwicht te beschrijven met een zogenoemde waterbalans, waarbij de totale toevoer gelijk is aan de totale afvoer, verminderd met de waterberging (toevoer = afvoer - waterberging).

De toevoer wordt onder andere veroorzaakt door neerslag, kwel, infiltratie uit sloten, lekkage uit waterleidingen en rioleringen en toestroming vanuit een aangrenzend gebied. De afvoer wordt bepaald door het wegzakken van het water in de grond, verdamping, stroming naar lekke riolering, stroming naar open water (sloten), stroming naar drainage en uitstroming naar een aangrenzend gebied.

• Grondwaterstroming

Omdat het grondwaterpeil afhankelijk is van zoveel factoren, is het bijna nooit overal even hoog. Wanneer men op twee verschillende punten een peiling naar het grondwater doet, zullen hier dan ook meestal verschillende hoogtes uitkomen. Het verschil in grondwaterpeil tussen twee meetpunten noemt men 'verval'. Het 'verhang' is dat verschil gedeeld door de afstand tussen die twee meetpunten. Beide termen zijn van belang bij de berekening van de grondwaterstroming.

Grondwaterstroming ontstaat wanneer op de ene plaats het grondwater hoger staat dan op de andere. Water zoekt altijd het laagste punt op, ook onder de grond. Alleen gaat het dan wat moeilijker, vooral als het water daarvoor door moeilijk doordringbare lagen moet.

De stroomsnelheid van het grondwater is dan ook afhankelijk van twee zaken: het drukverschil en het vermogen van de grond om water door te laten. Waar de waterstand hoger is, is ook de waterdruk (de potentiaal) hoger. De stroming verloopt van een punt met een hoge potentiaal naar een punt met een lagere potentiaal. Een goed waterdoorlatende grond laat per tijdseenheid een veel grotere hoeveelheid water door dan een slecht doorlatende. In vaste grond zoals klei stroomt het water langzamer dan in losse zandgrond, of grind.

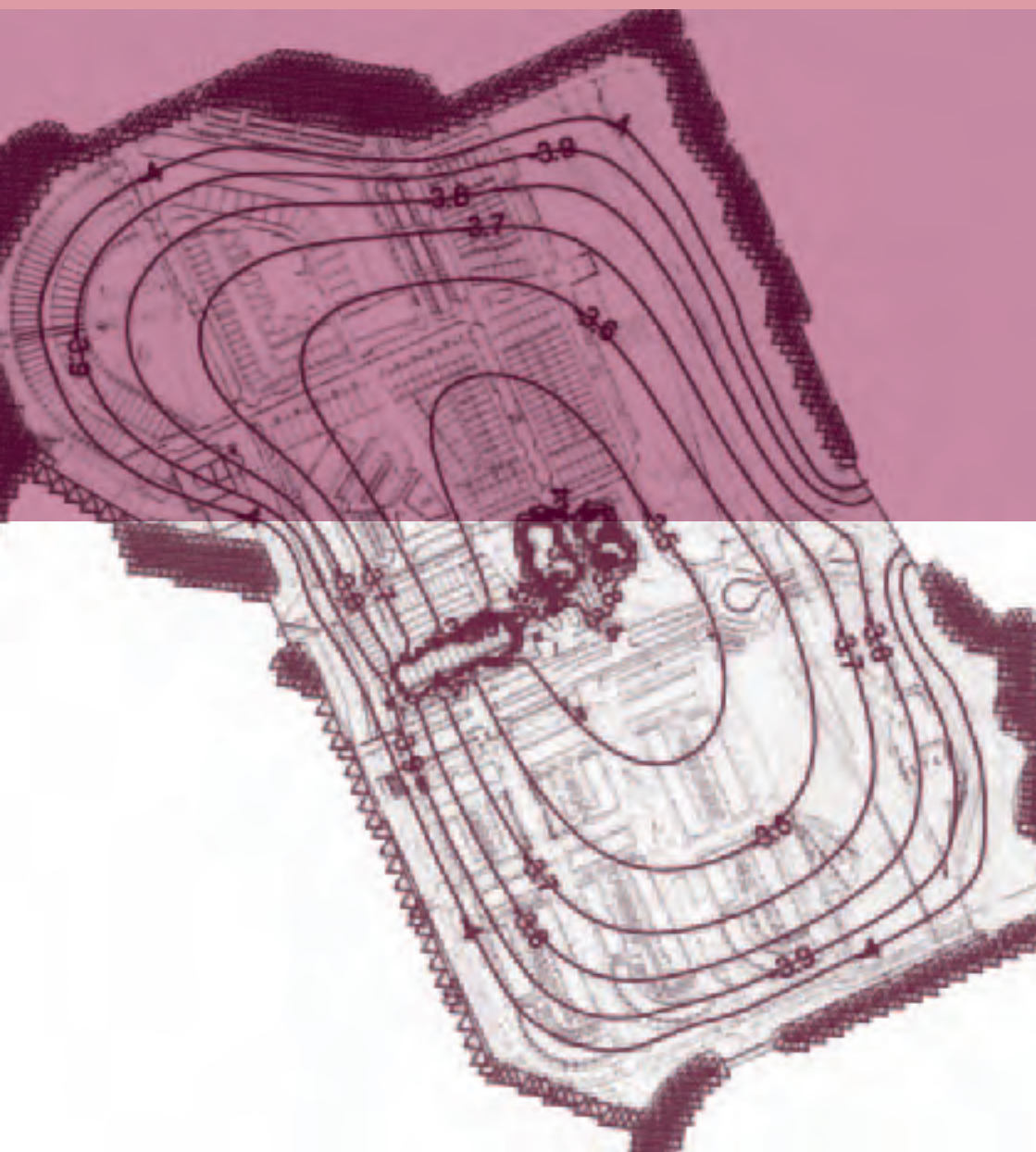
De stroomsnelheid is te berekenen met behulp van de Wet van Darcy. Met behulp hiervan kan experimenteel de 'doorlatendheidscoëfficiënt' (k) worden vastgesteld. Als deze constante vermenigvuldigd wordt met het verhang (i), dan is de stroomsnelheid bekend ($v = k \cdot i$).

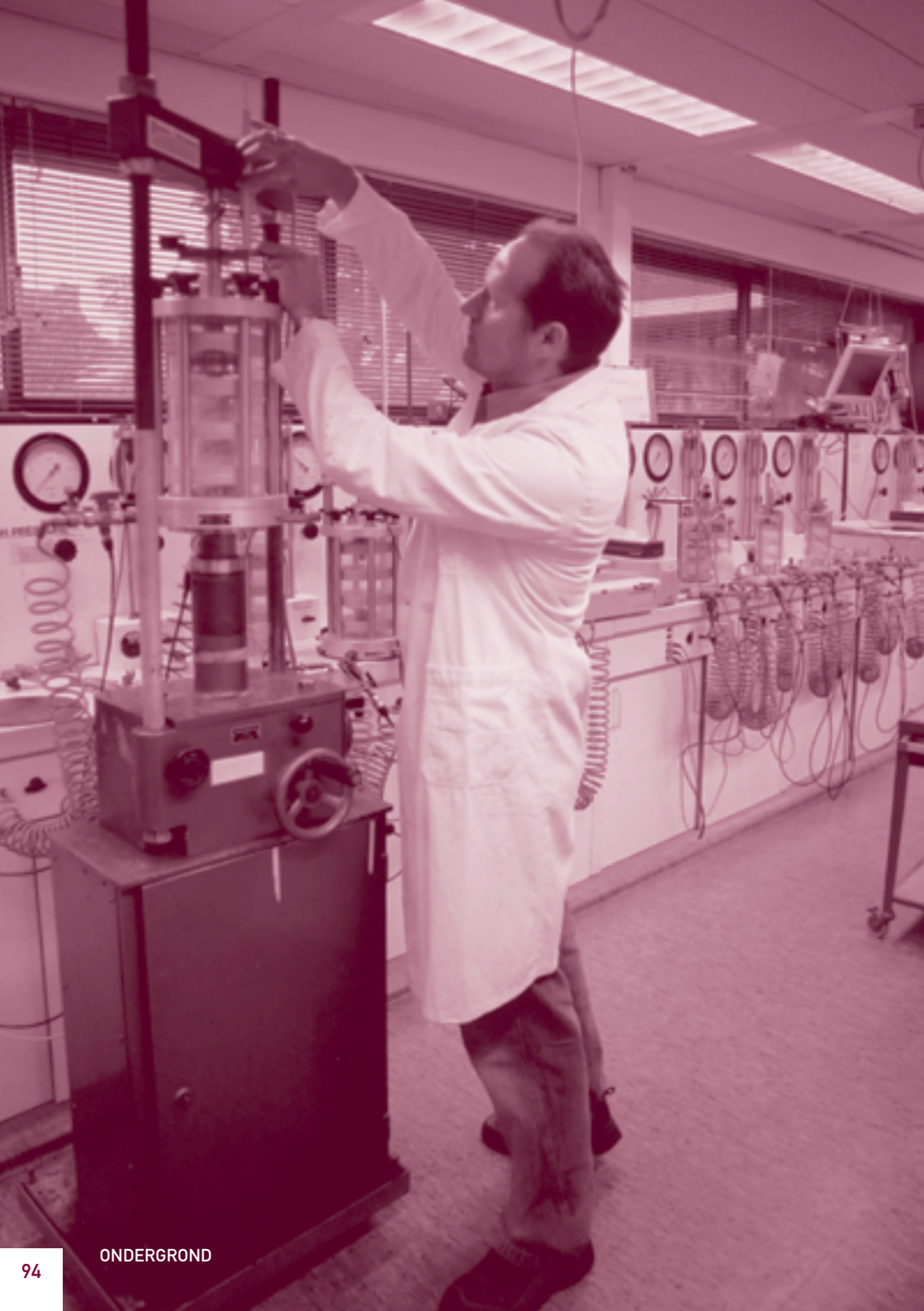
Tabel 8.12 geeft een indicatie van de doorlatendheidscoëfficiënt van enige grondsoorten.

Grondsoort	Doorlatendheidscoëfficiënt [m / s]
Grind	$10^{-2} - 10^{-2}$
Zand	$10^{-2} - 10^{-5}$
Zandhoudende klei	$10^{-5} - 10^{-7}$
Klei	$10^{-7} - 10^{-11}$
Veen	$10^{-7} - 10^{-9}$

Tabel 8.12: Indicatie doorlatendheidscoëfficiënten

Door meerdere peilbuizen op een terrein te plaatsen en die af te lezen, kunnen lijnen worden berekend die een gelijke stijghoogte hebben. Dit soort lijnen noemt men 'isohypsen'. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in figuur 8.13





9 LABORATORIUM- ONDERZOEK

Sonderingen en boringen zijn niet zonder meer geschikt voor het berekenen van de draagkracht, de sterkte-eigenschappen, de samendrukbaarheid of de verwerkbaarheid van de bodem. Uit de sondeergrafieken worden weliswaar vaak reken-grootheden afgeleid (correlaties), maar de waarde die hieraan wordt gehecht loopt sterk uiteen. Daarom zijn ze in eerste instantie vooral geschikt om een grove prognose te maken. Als nauwkeurigere berekeningen nodig zijn, moet de grond in het laboratorium worden onderzocht.

Monsters nemen

Allereerst moeten grondmonsters van de bodem op de projectlocatie genomen worden. Daarvoor moeten boringen worden uitgevoerd, waaruit geroerde en ongeroerde monsters zijn betrokken. Hoe dit gaat, is in hoofdstuk 5 beschreven. Van het boorgoed dat tijdens de uitvoering van de boring vrijkomt, trekt men regelmatig een (uiteraard geroerd) grondmonster. Dit gebeurt zeker elke keer als de grondsoort verandert. Het geroerde monster wordt in een plastic zakje gedaan en van een label voorzien. Op het label noteert men het boringnummer en de diepte van de laag waarvoor het monster representatief wordt geacht (bovenkant en onderkant van de laag). De boormeester benoemt de grondsoort en schrijft dit op in zijn boorboekje. Tijdens het boren worden op vooraf aangegeven diepten ook ongeroerde monsters gestoken.

Laboratoriumproeven

In het laboratorium aangekomen, worden de geroerde monsters opnieuw beoordeeld, waarbij de boorbeschrijving wordt vergeleken met de beschrijving van de boormeester. Aan de hand van deze beschrijving wordt een boorprofiel getekend. Hierin zijn ook de diepte van de ongeroerde monsters en eventuele peilbuisgegevens aangegeven. Dit boorprofiel gaat naar de geotechnisch adviseur, die dan de benodigde proeven op kan geven. Laboratoriumproeven worden meestal op ongeroerde monsters uitgevoerd.

De meest uitgevoerde laboratoriumproeven:

- Bepaling van het natuurlijke en het droge volumegewicht, met bepaling van de verzadigingsgraad en het watergehalte.
- Zeefproeven voor het bepalen van de korrelverdeling.
- Het bepalen van de snelheid waarmee een grond verweekt als hij vochtig wordt (de Atterbergse consistentiegrenzen).
- Samendrukkingsproeven voor zettingsberekeningen en het tijd-zakkingsgedrag.
- Het bepalen van de sterkteparameters (m.b.v. triaxiaalproeven).
- Doorlatendheidsproeven op zand en slecht doorlatende grondsoorten.

• Volumegewicht en vochtgehalte

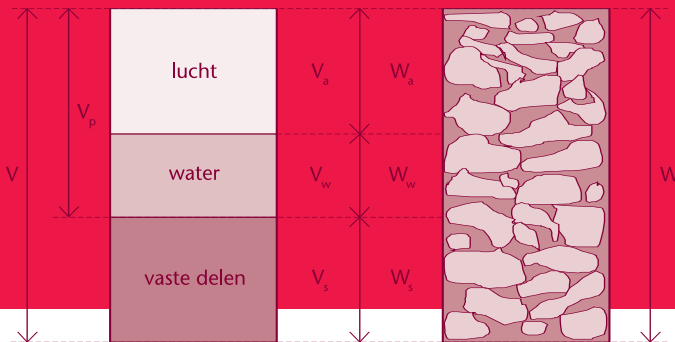
Om berekeningen te kunnen maken, is het belangrijk dat de grondspanningen op bepaalde diepten bekend zijn. Uit de verticale grondspanningen en de water-spanningen kunnen de horizontale spanningen berekend worden (zie hoofdstuk 8), die nodig zijn om bijvoorbeeld grondkerende constructies of terreinzettingen te kunnen berekenen.

Grond is een zogenoemd meerfasen materiaal en bestaat uit drie componenten te weten: korrels, water en lucht. De drie componenten zijn schematisch weergegeven in figuur 9.1

Door uit een ongeroerd grondmonster met een volume-ring een bepaalde hoeveelheid grond te steken en te wegen, kan het volumegewicht (de volumieke massa) worden berekend. Vervolgens wordt het monster gedurende 24 uur bij een temperatuur van 105° Celsius gedroogd en opnieuw gewogen. Voor de Nederlandse grond wordt meestal aangenomen dat het soortelijke gewicht van de grondkorrels 2650 kg/m³ bedraagt (kwartzand). Met dit gegeven kan het poriën-

Figuur 9.1: Fasenschema

V	= totale volume	W	= totale gewicht van het grond- element;
V_p	= volume van de poriën	W_w	= gewicht van water;
V_a	= volume van het luchtdeel;	W_s	= gewicht van de vaste delen.
V_w	= volume van het waterdeel;		
V_s	= volume van de vaste delen.		



percentage worden berekend. Humusrijke grond bestaat zowel uit organisch als anorganisch materiaal. In dat geval is het poriënvolume minder goed te bepalen.

Aan de hand van deze proef kunnen diverse grootheden worden berekend, zoals de porositeit (e), het poriëngetal (n) en het watergehalte.

• Relatieve dichtheid

Ten gevolge van trillingen kunnen zandkorrels dichter op elkaar komen te zitten. Dit heet een vastere pakking krijgen. Tijdens het intrillen van damwandplanken treden sterke trillingen op in de grond. In zandgrond heeft dit onherroepelijk maaiveldzakkingen tot gevolg. Dit kan weer leiden tot schade aan bebouwing en de infrastructuur.

Om inzicht te krijgen in welke mate de zandlagen op de bouwlocatie gevoelig zijn voor trillingen, is het van belang de relatieve dichtheid te kennen. In het laboratorium wordt gemeten hoe de bestaande dichtheid van het zand zich verhoudt tot de meest losse pakking van het zand en de dichtst mogelijke pakking.

De meest losse korrelstapeling ($e_{\min}$) wordt bepaald door droog zand of grind los in een volume-ring te storten en te wegen. De maximale dichtheid ($e_{\max}$) wordt bepaald door datzelfde zand gedurende twintig minuten op een triltafel te verdichten en na afloop het volumegewicht te bepalen.

De relatieve dichtheid (D_r) wordt vaak uitgedrukt als een percentage. Wanneer zand een relatieve dichtheid te zien geeft van minder dan 0,3 (30%), dan wordt het als los gepakt beschouwd. Een waarde van 0,3 tot 0,7 (30 tot 70%) wordt als matig gepakt beschouwd. Boven 0,7 (70%) is het dicht gepakt.

Samenhangende grondsoorten als klei hebben een veel hoger poriënpercentage, tussen 50 en 80 %. De afzonderlijke poriën in klei en leem zijn veel kleiner dan in zand.

Er wordt veel gebruik gemaakt van de correlaties tussen de relatieve dichtheid, bij een bepaalde grondspanning in het terrein, met de sondeerweerstand.

• Korrelverdeling

Een grondsoort wordt gekenmerkt door de grootte van de korrels en onderlinge verhouding. De grondsoorten (grind, zand, leem, klei, etc.), zijn in diverse korrelgrootten ondergebracht. Tabel 9.2 geeft een overzicht van deze soortnamen.

In het algemeen bestaat grond uit deeltjes (korrels) van verschillende grootte en verschillend materiaal. Voordat een korrelverdeling van een monster met organisch materiaal kan worden gemaakt, moet eventueel aanwezige organische stof worden uitgegleoid.

Korrelgrootte [mm]	Benaming
< 0,002	Klei
0,002 tot 0,063	Silt
0,063 tot 2,0	Zand
2,0 tot 20,0	Grind
> 20,0	Steen

Tabel 9.2: Grondsoortnamen

De grove fractie van het grondmonster wordt door middel van zieving bepaald. Voor de deeltjes kleiner dan 0,063 mm (63 μm) is dit niet mogelijk. In dat geval wordt natte zieving toegepast. Voor de deeltjes kleiner dan 16 μm wordt een pipet of hydrometer (bezinkmethode) toegepast.

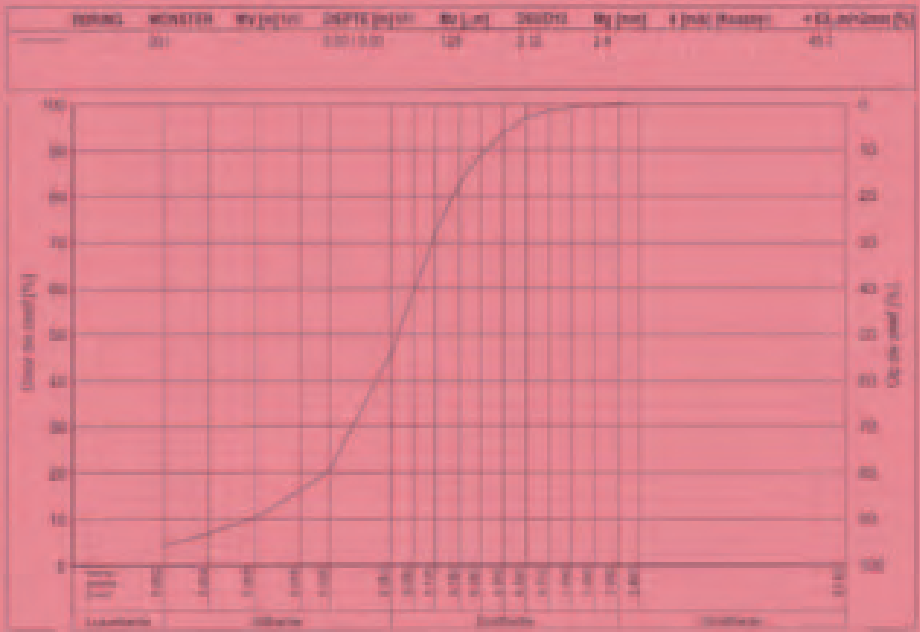
Van nature komen zuivere fracties bijna niet voor. Meestal bestaat een grondmonster uit meerdere fracties. In figuur 9.3 is een korrelverdelingsdiagram (zeefkromme) gegeven van een zandmonster. De bepaling heeft plaatsgevonden volgens NEN 2560.

Aan de hand van een korrelverdelingsdiagram kan bijvoorbeeld een schatting worden gemaakt of de grond goed te verdichten is. Hoe vlakker het diagram verloopt, hoe groter de verscheidenheid aan korrelafmetingen. De kleine korrels passen in de poriën tussen de grotere korrels, dus de grond is beter te verdichten. Een steil oplopend diagram duidt op een grote gelijkvormigheid en is dus minder goed te verdichten.

Uit de korrelverdeling kan ook een schatting worden gemaakt voor de waterdoorlatendheid van de grond. Hierover is in de literatuur genoeg te vinden [o.a. Kozeny]. Dit is een grove benadering, die dus met enige voorzichtigheid moet worden gehanteerd, want de pakingsdichtheid kan niet uit het korrelverdelingsdiagram worden afgeleid.

Als de grond uit bolvormige korrels zou bestaan, dan heeft de meest losse korrelstapeling een holtepercentage van 47,6 % en de dichtst mogelijke stapeling een holtepercentage van 25,9%. Uit hoe meer fijne deeltjes grond bestaat, hoe samenhangender de grond wordt. Samenhangende grondsoorten als klei hebben een veel hoger poriënpercentage (van 50% tot 80%). De afzonderlijke poriën zijn in klei en leem veel kleiner zijn dan in zand of grind.

Figuur 9.3: korrelverdelingsdiagram



- **Atterbergse consistentiegrenzen**

Om te kunnen beoordelen of een samenhangende grond geschikt is voor een bepaalde toepassing, bijvoorbeeld als bekleding van een dijktaalud, kunnen de Atterbergse consistentiegrenzen worden bepaald. Hiermee wordt vastgesteld of de grond zijn samenhang behoudt als hij nat wordt – bij dijken een eerste voorwaarde natuurlijk.

Voor de verschillende toepassingen zijn verschillende grootheden gedefinieerd. De belangrijkste hiervan zijn de uitrolgrens en de vloeigrens.

Bepaling van de uitrolgrens (Plastic Limit - PL).

Voor de bepaling van de uitrolgrens worden van een grondmonster met de hand draden gerold. Van elk monster wordt het vochtgehalte bepaald, nadat het vochtgehalte door drogen is verminderd ten opzichte van het vorige monstergedeelte. Als nog draden kunnen worden gerold van 3 mm dik, is de klei nog plastisch. Hoe droger het monster wordt, hoe sneller de draden breken. Het vochtgehalte waarbij nog juist draden van 3 mm dik kunnen worden gemaakt, wordt de uitrolgrens genoemd.

Bepaling van de vloeigrens (Liquid Limit - LL)

Als grondmateriaal steeds natter wordt gemaakt, dan zal het eerst plastisch zijn en bij stijgend vochtpercentage vloeibaar worden. De overgang van de ene fase naar de andere is niet scherp en arbitrair gedefinieerd. Deze grens wordt vloeigrens genoemd. De vloeigrens wordt bepaald met het toestel van Casagrande (zie figuur 9.4). Een nat gemaakt grondmonster wordt in het schaalpje gelegd terwijl met een spatel een V-vormige groef in het grondmateriaal wordt getrokken. Vervolgens laat men het schaalpjes vanaf 10 mm vallen.

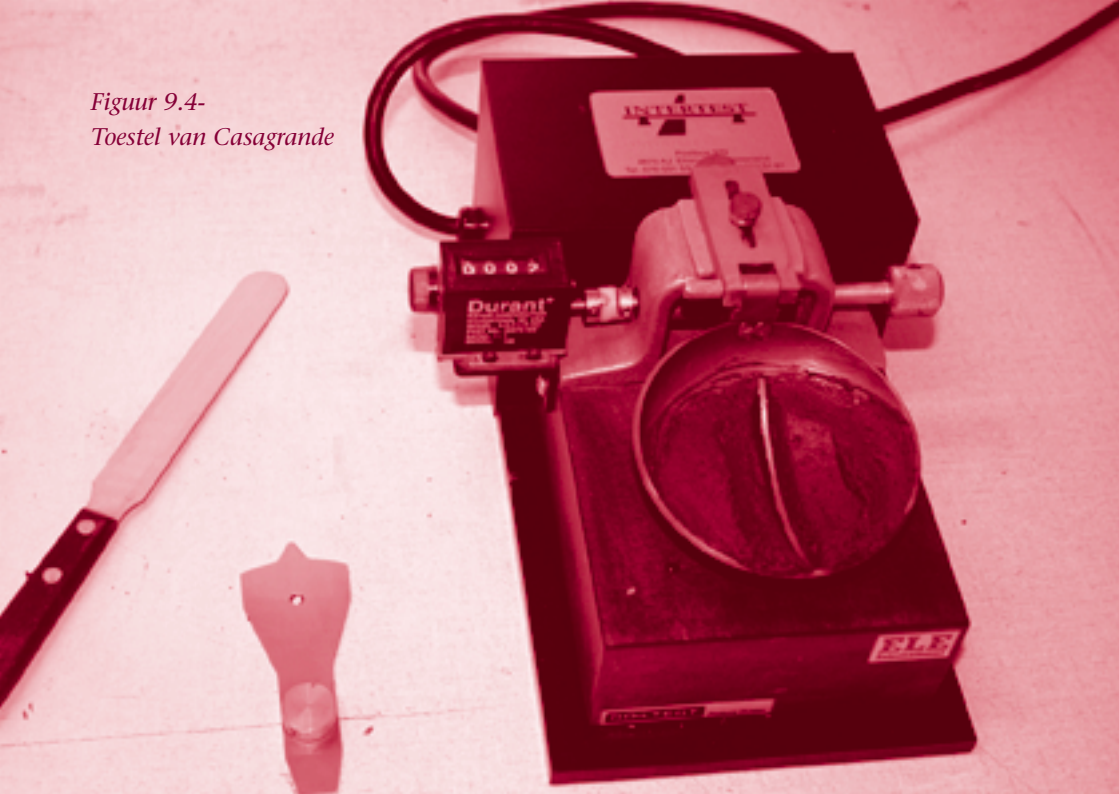
Zolang het monstermateriaal niet nat genoeg is, blijft de groef in tact nadat het schaalpje een aantal keren is gevallen. Bij toenemend vochtgehalte zal de groef op den duur dichtvloeien. De vloeigrens is het vochtgehalte waarbij de groef zich juist sluit als het schaalpje 25 keer is gevallen.

Bij de uitrolgrens wordt het laagste vochtgehalte bepaald waarbij de grond nog plastisch is, bij de vloeigrens de hoogste vochtigheid. Het verschil tussen beide grenzen wordt de plasticiteitsindex genoemd. Hoe kleiner dit getal is, hoe gevoeliger de grond is voor kleine wisselingen in het vochtgehalte. Dit betekent dat de grond in natte perioden snel verweekt en dus slecht verwerkbaar is.

- **Samendrukkingproef**

Terreinophogingen, funderingsbelastingen en dergelijke veroorzaken een hogere

*Figuur 9.4-
Toestel van Casagrande*



Plasticiteitsindex

De plasticiteitsindex (PI) is het verschil tussen de vochtgehaltes van grond bij de vloeigrens (LL) en de uitrolgrens (PL). Deze index geeft feitelijk de plastische fase van de grond aan en is een aanduiding voor het traject van de verwerkbaarheid. De verwerkbaarheid van bijvoorbeeld klei wordt bepaald door de uitrolgrens (te droog) en de vloeigrens (te nat). Indien de plasticiteitsindex te klein is, zijn de verwerkingsmogelijkheden beperkt.

verticale spanning in de grond. Als gevolg hiervan worden de grondlagen samengedrukt. Om een inzicht te krijgen in de grootte van de zettingen, kunnen op ongeroerde grondmonsters samendrukkingproeven worden gedaan.

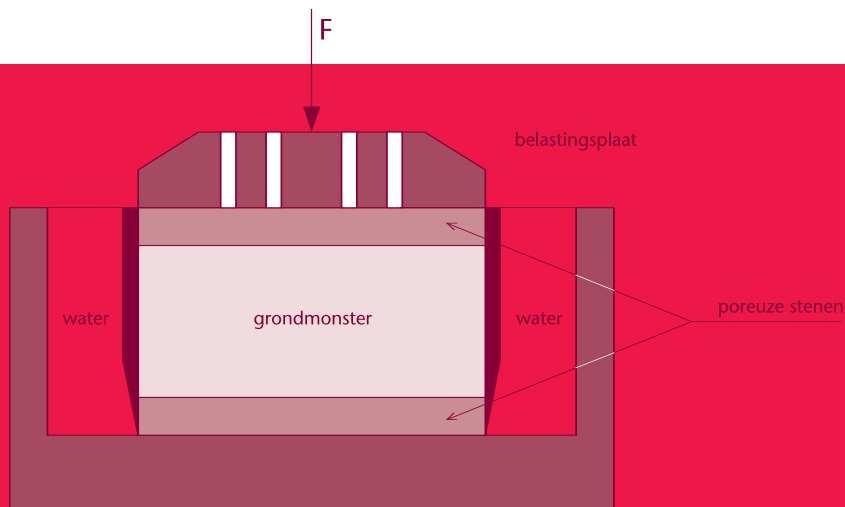
Voor de samendrukkingproef wordt een grondmonster met een hoogte van ongeveer twintig millimeter in een samendrukkingapparaat geplaatst. Het monster wordt trapsgewijs, in tussenpozen van enkele dagen, belast. Meestal worden vijf belastingstrappen gebruikt. Gedurende de belastingstijd wordt de samendrukking gemeten.

De samendrukking blijkt bij gelijkblijvende belasting in de tijd toe te nemen. Zelfs na lange tijd ontstaat geen eindwaarde.

De snelheid van de samendrukking neemt met de tijd af. Dit is in overeenstemming met de hypothese dat de vertraging van de samendrukking wordt veroorzaakt doordat poriewater moet afstromen.

Voor de bepaling van de samendrukkingconstanten wordt gebruik gemaakt van twee grafieken die het verband aangeven tussen de samendrukking en de tijd, respectievelijk tussen de samendrukking en de belasting.

Het is mogelijk om aan de hand van een samendrukkingproef, naast de samen-



figuur 9.5: Samendrukkingproef

drukkingconstanten, ook de waterdoorlatendheid en het tijd/zakkingsgedrag af te leiden.

Zo kan een prognose voor de tijd gemaakt worden waarin een bepaalde zetting tot stand komt. Dit is bijvoorbeeld belangrijk voor het bepalen van de tijd dat een voorbelasting van een terrein aanwezig moet zijn om toekomstige zettingen binnen de perken te houden. Dit speelt een belangrijke rol bij de onderhoudskosten voor autosnelwegen. Als de ondergrond te snel zakt en de verschilzettingen worden te groot zijn, dan is eerder een nieuw wegdek nodig, wat gepaard gaat met aanzienlijke kosten. Hiermee kan bij het ontwerp rekening worden gehouden.

Waterdoorlatendheid

Om de capaciteit van een bemaling te kunnen berekenen moet de waterdoorlatendheid van de grond worden bepaald. Andere toepassingen zijn bijvoorbeeld het onderzoeken van de mogelijkheid om met bodeminjectie de sterkte-eigenschappen van de grond te vergroten. Hiervoor kunnen doorlatendheidsproeven worden gedaan. Met deze laboratoriumproeven wordt de doorlatendheidscoëfficiënt volgens Darcy bepaald. Het is ook mogelijk om de waterdoorlatendheid in het veld te bepalen. Dit laatste geeft een meer betrouwbare waarde.

Afhankelijk van de grondsoort (bijvoorbeeld zand of klei) worden verschillende doorlatendheidsproeven gedaan.

Voor zandgrond worden zogenoemde constant-headproeven gedaan, terwijl voor kleigrond falling-headproeven geschikter zijn. Zoals bij de samendrukkingproef al is beschreven, is het ook mogelijk de doorlatendheid daaruit af te leiden.

• Constant Head proef

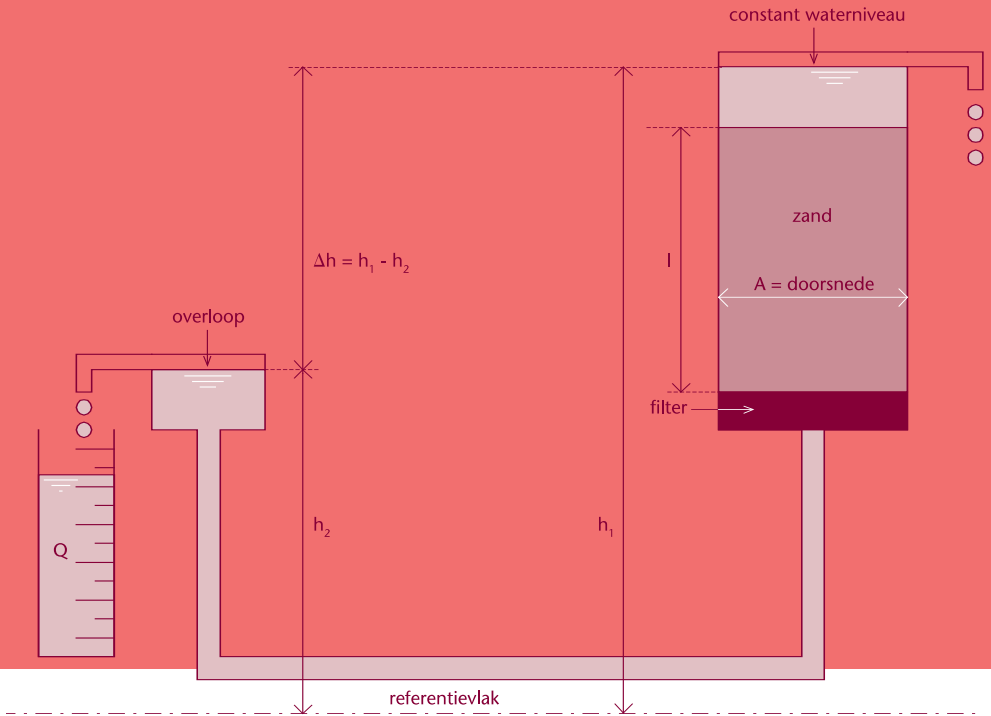
Deze proef is geschikt voor waterdoorlatende gronden zoals zand. In figuur 9.6 is de schematische opstelling weergegeven.

Zoals uit het schema blijkt wordt de hoogte h_1 constant gehouden en de hoeveelheid uitgestroomd water wordt gemeten. Hiermee zijn alle onderdelen van de formule van Darcy bekend; de hoeveelheid water die per seconde uitstroomt (stroomsnelheid) en het verhang ($\Delta h/l$). De doorlaatbaarheidscoëfficiënt is nu eenvoudig af te leiden door beide gevonden waarden door elkaar te delen.

• Falling Head proef

Voor slecht doorlatende grond is de hoeveelheid doorgestroomd water klein. Dit bemoeilijkt het meten. De verdamping van het doorgestroomde water is al van invloed op het resultaat. Daarom wordt voor slecht doorlatende grond, zoals klei en leem, de falling head methode gebruikt. In figuur 9.7 is de schematische opstelling weergegeven. Het monster wordt in het apparaat gezet en er wordt een

figuur 9.6: doorlatendheidsproef op zand (constant head)



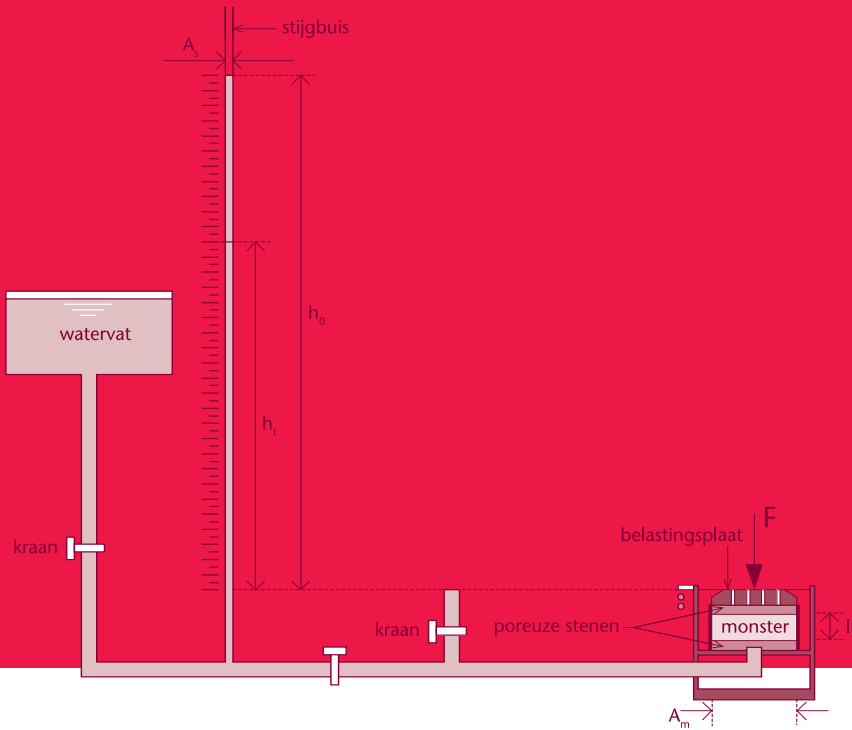
belasting F aangebracht. Na ontluchting van het systeem wordt het begin waterhoogteverschil (h_0) afgelezen voor het tijdstip $t = 0$. Na een bepaalde tijd (t_1) wordt de nieuwe stijghoogte afgelezen. Uit het verschil en de hoeveelheid doorgestroomd water wordt de doorlatendheidscoëfficiënt berekend.

- **Triaxiaalproef**

Om grondkerende constructies, zoals wanden van tunnels, te kunnen berekenen, moet de hoek van inwendige wrijving (zie hoofdstuk 8) en de cohesie van de grond worden bepaald. Hieruit kan de verhouding tussen de verticale en de horizontale spanningen in de grond worden berekend.

De triaxiaalproef is hiervoor de meest gebruikte proef. Hierbij wordt een, door een rubber membraan omhuld, monster in een perspex cilinder op een voetplaat geplaatst. De onder en bovenzijde worden met een rubberring afgesloten, zodat het monster volledig is geïsoleerd van de omgeving. De waterdruk in de cel en die in het monster kunnen dus beide worden gemeten. De opstelling van de proef is

figuur 9.7: falling head apparaat



schematisch aangegeven in figuur 9.8. In figuur 9.9 is de proefopstelling te zien in een laboratorium. Met deze proef kunnen alle spanningcondities worden aangebracht op een grondmonster. Niet alleen van boven kan de druk, via de plunjer, worden opgevoerd, maar ook de celdruk kan worden opgevoerd, waardoor de horizontale druk wordt beïnvloed.

Triaxiaalonderzoek, en zeker speciaal onderzoek, is in de uitwerking complex. Daarom wordt hier volstaan met een globale beschrijving van de proef gebaseerd op de klassieke schuifweerstandrelatie, volgens Mohr-Coulomb. Deze wordt in de meeste berekeningen toegepast. De proef heeft het voordeel dat tijdens de uitvoering de drainagecondities kunnen worden gecontroleerd en gestuurd. Onder natuurlijke omstandigheden zal water dat onder druk staat immers ook willen wegstromen naar plaatsen met een lagere druk.

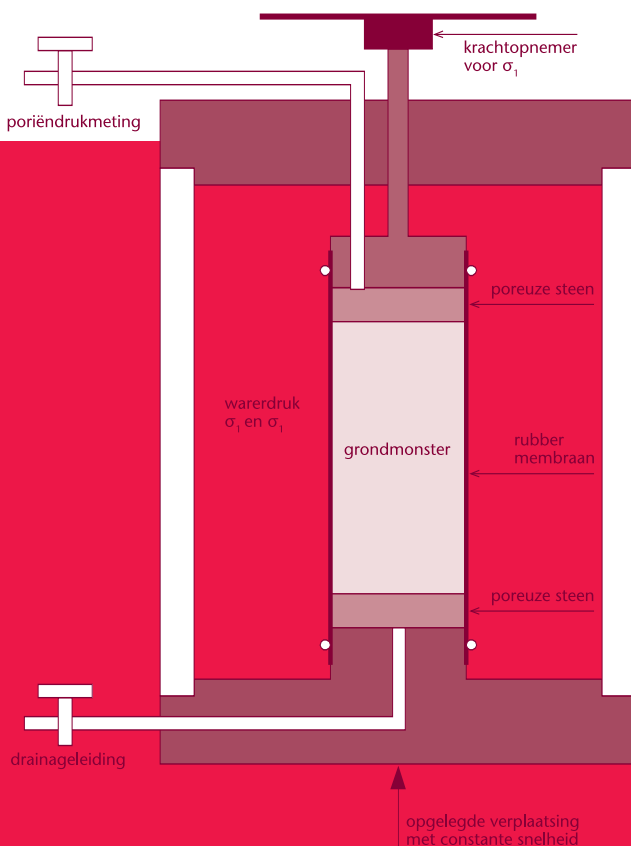
Voor de proef wordt een cilindrisch grondmonster met een hoogte/diameter-verhouding van 2 gebruikt. Het grondmonster wordt omgeven door een rubber membraan om contact te vermijden met het water in de cel. Tussen het monster

en het membraan wordt filterpapier aangebracht. Door de 'deksel' van de triaxiaalcel is een pen aanwezig waarmee de kracht wordt gemeten die in het monster ontstaat als gevolg van de opgelegde verplaatsing. De verplaatsingssnelheid is meestal heel laag. Tevens is daar een slangetje doorgevoerd, waarmee de poriëdruk kan worden gemeten. Bij een triaxiaalproef worden dus de verplaatsing en het verloop van de kracht en de poriëndruk gemeten.

Het water in de perspex cilinder kan onder druk worden gebracht, waardoor er een alzijdige steundruk op het monster aanwezig is. Deze druk kan worden verhoogd of verlaagd. Drainage wordt geregeld door een afsluiter te openen of te sluiten, waardoor ingaand of uitgaand water wordt gecontroleerd. Indien de afsluiter is geopend, is sprake van een zogenaamde gedraineerde proef. Indien de afsluiter gesloten blijft dan is sprake van een ongedraineerde proef.

De proeven worden meestal in series van drie monsters van dezelfde grond onder verschillende belastingsituaties uitgevoerd.

*Figuur 9.8:
principe opstelling
triaxiaalproef*





Opstelling triaxiaalproef in het laboratorium

Er worden drie soorten proeven onderscheiden te weten:

- **Ongeconsolideerd-ongedraind (UU-proeven Unconsolidated-Undrained)**

Hierbij wordt op het grondmonster een alzijdige spanning aangebracht, waarna een spanningsverschil wordt aangebracht tussen de verticale spanning en de horizontale spanning (spanningsverschil tussen de hoofdspanningen), totdat het monster is bezweken. Er wordt geen drainage toegestaan. De meeste UU-proeven worden uitgevoerd onder isotrope spanningscondities (alle spanningen gelijk). Dit type proef wordt gedaan om de ongedraineerde sterkte van een samenhangende, slecht doorlatende grond (klei e.d.) te bepalen.

- **Geconsolideerd-ongedraind (CU-proeven Consolidated-Undrained).**

Hierbij wordt drainage toegestaan onder een alzijdige spanningsconditie totdat het monster is geconsolideerd. De wateroverspanning is dan 0. Meestal gebeurt

dit onder de spanningsconditie die overeenkomt met de terreinspanning van het grondmonster. Daarna wordt een spanningsverschil aangebracht tussen de horizontale spanning en de verticale spanning waarbij geen drainage wordt toegestaan. De proef wordt meestal uitgevoerd totdat het grondmonster is bezweken. Deze proeven worden in de praktijk het meeste gebruikt. Bij slecht waterdoorlatende gronden kan de consolidatie soms tot een week oplopen. Het principe van de proef is, dat het grondmonster zo goed mogelijk wordt teruggebracht in de spanningsconditie zoals die was voordat het grondmonster werd genomen. Door tijdens het beproeven de poriedruk te meten, kan de effectieve korrelspanning goed worden berekend, waaruit weer de effectieve hoek van inwendige wrijving en de cohesie kunnen worden afgeleid.

- **Geconsolideerde-gedraind (CD-proeven Consolidatied-Drained)**

Hierbij wordt drainage toegestaan onder een alzijdige spanningsconditie totdat het monster is geconsolideerd. De wateroverspanning is dan 0. Meestal gebeurt dit onder de spanningconditie die overeenkomt met de terreinspanning van het grondmonster

Daarna wordt een spanningsverschil aangebracht tussen de horizontale spanning en de verticale spanning waarbij drainage wordt toegestaan. De proef wordt meestal uitgevoerd totdat het grondmonster is bezweken. Dit type wordt gebruikt als bij een belastingverhoging van de grond geen poriewateroverspanning kan ontstaan, dus voor goed waterdoorlatende grond, zoals zand.



10 UITVOERINGS- NORMEN

Bij de voorbereiding van een bouwproject vraagt normaal gesproken de opdrachtgever een bodemonderzoek aan. Deze kent de aard van de constructie en kan daardoor meestal het best het benodigde onderzoek specificeren.

Toch kan het ook nuttig zijn om hierbij een gespecialiseerd adviesbureau te betrekken. Deze zal ook ervaringen kunnen inbrengen die zijn opgedaan bij vergelijkbare constructies. Bovendien is deze precies op de hoogte van de wettelijke eisen waaraan geotechnisch bodemonderzoek moet voldoen. Deze eisen gelden niet alleen de inhoud, maar ook de omvang en de uitvoering. De regels hiervoor worden opgesteld door het NEN, het Nederlands Normalisatie Instituut. Deze normen zijn te bestellen of te downloaden (tegen betaling) via de website van het NEN, <http://www.nen.nl>. In dit hoofdstuk komen in het kort de normen aan bod die bij bodemonderzoek van toepassing zijn.

Sonderen

De sondeenorm NEN 3680 dateert uit 1982 en geldt alleen voor mechanische sonderingen. Mechanische sonderingen worden meestal gebruikt in gebieden waar de ondergrond relatief vast tot hard is en/of sterk grind- of steenhoudend. Omdat het mechanisch sonderen naar verwachting ook in de toekomst nog regelmatig gebruikt zal worden, wordt hiervoor in Europees verband een aparte norm uitgebracht.

Elektrische sonderingen hebben een veel grotere nauwkeurigheid dan mechanische. Ze dienen te worden uitgevoerd volgens de in 1996 verschenen sondeenorm NEN 5140. Deze norm gaat uit van vier kwaliteitsklassen. Voorafgaand aan de uitvoering moet de keuze worden gemaakt welke kwaliteitsklasse voor het werk is vereist. Het komt regelmatig voor dat een klasse wordt gekozen die niet overeenkomt met het beoogde gebruiksdoel. In dat geval zijn de resultaten onvoldoende nauwkeurig óf overdreven nauwkeurig. Beide gevallen leiden tot hogere kosten. De klasse-indeling heeft voornamelijk betrekking op de nauwkeurigheid van de gemeten conusweerstand, de plaatselijke wrijvingsweerstand en de diepteregistratie, zoals ook blijkt uit de tabel 10.1.

Klasse	Meetgrootheid	Toelaatbare meetonzekerheid	Meetinterval
1	Conusweerstand	0,05 MPa of 3%	20 mm
	Plaatselijke wrijvingsweerstand	0,01 MPa of 10%	
	Helling	2°	
	Sondeerdiepte	0,2 m of 1 %	
2	Conusweerstand	0,25 MPa of 5%	50 mm
	Plaatselijke wrijvingsweerstand	0,05 MPa of 15%	
	Helling	2°	
	Sondeerdiepte	0,2 m of 2 %	
3	Conusweerstand	0,5 MPa of 5%	100 mm
	Plaatselijke wrijvingsweerstand	0,05 MPa of 20%	
	Helling	5°	
	Sondeerdiepte	0,2 m of 2 %	
4	Conusweerstand	0,5 MPa of 5%	100 mm
	Plaatselijke wrijvingsweerstand	0,05 MPa of 20%	
	Sondeerlengte	0,1 m of 1%	
De toelaatbare meetonzekerheid is de grotere waarde van de absolute meetonzekerheid en de relatieve			

Tabel 10.1 Sondeerclassen volgens NEN 5140

Het verschil tussen klasse 3 en 4 is het wel of niet meten van de helling van de sondeerconus. De meetonzekerheid beschouwt het complete meetsysteem, vanaf de inwendige opnamer in de sondeerconus tot en met het grafisch weergeven van de resultaten.

Om aan de kwaliteitseisen te kunnen voldoen is regelmatige kalibrering van de conus en controle op slijtage van conus en kleefmantel vereist. Verder wordt de nauwkeurigheid van de meting ook bepaald door de nauwgezetheid van de uitvoering en door de meetomstandigheden, zoals temperatuurverschillen.

Ook de eisen voor de uitvoering en registratie van sonderingen verschillen per klasse. De presentatie van sondeergegevens voor klasse 1 en 2 omvat bijvoorbeeld een sondeertabel, waarin onder andere de conusweerstand en de tijd zijn vermeld. Dit maakt een nauwkeurigere beoordeling van de sondeergegevens mogelijk.

In tabel 10.2 is een aantal specifieke toepassingen voor de verschillende sondeerclassen gepresenteerd. Hierbij is tevens aangegeven voor welke geotechnische constructies de verschillende sondeerclassen kunnen worden ingezet. Volgens NEN 6740 'Basiseisen en belastingen' worden geotechnische constructies ingedeeld in drie geotechnische categorieën (GC), oplopend in complexiteit en risico; van GC1 (voor relatief eenvoudige constructies, zoals lichte bouwwerken en onbeduidende ophogingen) tot GC3 (voor zeer grote of bijzondere constructies, zoals hoge gebou-

wen, tunnels en waterkeringen). In artikel 6.2 van NEN 6740 wordt vermeld op welke constructies de verschillende geotechnische categorieën betrekking hebben.

Sondeerklasse NEN 5140	Specifieke toepassingen	Geotechnische Categorie NEN 6740
3, 4	- classificatie/schematisering van zand en klei/veen	GC1, GC2
	- ontwerp van funderingen op (druk)palen (NEN 6743)	
2	- classificatie/schematisering van zand, (stijve) klei en veen	GC2, GC3
	- ontwerp van funderingen op kleefpalen	
	- correlaties voor de bepaling van geotechnische parameters van (stijve) klei en zand	
1	- classificatie/schematisering van zand, (slappe) klei en veen	GC3
	- correlaties voor de bepaling van geotechnische parameters van (slappe) klei en veen	

Tabel 10.2 Specifieke toepassingen voor de sondeerklassen volgens NEN 5140

In de tabellen is zichtbaar dat het zogenaamde ‘onderscheidend vermogen’ (afleiden van grondsoort en parameters) van de sonderingen toeneemt, naarmate de nauwkeurigheidsklasse hoger is. Op basis van sondeerresultaten volgens klassen 3 of 4 is het goed mogelijk om onderscheid te maken tussen zand en cohesieve grondsoorten, zoals klei of veen.

Voor Nederlandse omstandigheden kan voor 70 à 80% van de sonderingen met klasse 2 en 3 worden volstaan. Alleen voor bijzondere studies / projecten is een hogere nauwkeurigheidsklasse vereist. Als zo’n hogere klasse vereist is, zullen de uitvoerende bedrijven hun meet- en bewerkingsproces voor deze klasse aanpassen en nauwkeurige systeemkalibreringen moeten uitvoeren. Hiermee zijn hogere kosten gemoeid. Opdrachtgevers moeten zich daarom realiseren dat de kosten van de sonderingen volgens klasse 1 ongeveer het dubbele bedragen van sonderingen in de klassen 2 en 3. Dit is mede afhankelijk van de bodemgesteldheid. In slappe grondlagen is het moeilijker om aan klasse 1 en 2 te voldoen.

De omvang van het sondeeronderzoek wordt in norm NEN 6740 mede afhankelijk gesteld van de homogeniteit van de grond. Zo is er bijvoorbeeld in een gebied met rivierafzettingen (en dus oude stroomgeulen in de ondergrond) meer onderzoek nodig dan in een homogeenere bodem, zoals de zandgronden in het oosten van het land. De afstand tussen de punten en de te verkennen diepte moeten worden bepaald op basis van de geologie van het gebied, de kennis van de grondgesteldheid, de afmetingen van het bouwterrein, de aard van de fundering en van de geotechnische constructie. De onderzoekspunten moeten zodanig over de plattegrond van het te bouwen project verdeeld zijn, dat de grondgesteldheid

van de geotechnische constructies ter plaatse betrouwbaar kan worden afgeleid.

Veiligheid en kwaliteit

Bij de meeste bedrijven worden de sonderingen uitgevoerd volgens NEN 5140 en een gecertificeerd kwaliteitssysteem. In een dergelijk kwaliteitssysteem zijn de procedures voor de kwaliteitsbewaking vastgelegd volgens ISO 9001 of ISO 9002. Het kwaliteitssysteem wordt regelmatig door een onafhankelijke instantie gecontroleerd. Zo'n controle wordt ook wel een 'audit' genoemd.

Voor de uitvoering in het veld wordt deze procedure ook getoetst aan de Veiligheids Checklijst Aannemers (VCA). De veiligheidsprocedures moeten zijn beschreven in een handboek dat door het bedrijf is opgesteld en aantoonbaar worden gehanteerd. Een onafhankelijke instantie beoordeelt het bedrijf.

Veiligheids Checklijst Aannemers VCA

Een gecertificeerd VCA-systeem biedt de volgende voordelen:

- Men voldoet aan de verplichtingen vanuit de Arbo-wet
- Het bevordert de veiligheid, gezondheid en het milieubewustzijn bij de medewerkers
- Het is een verbetering van de organisatie van werken op locatie

Voor werken langs de openbare weg, snelwegen en spoorwegen is meestal een VCA-certificaat vereist. Dit om te zorgen dat de aannemer zijn verplichtingen voor arbeidsomstandigheden afdoende heeft geregeld. Hiermee kunnen onveilige situaties en handelingen worden voorkomen en in geval van (bijna) ongevallen worden beheerst. Voor werken aan de spoorwegen is een VCA en BTR (Branchegerichte Toelichting Railinfra) vereist.

Boren

Boringen voor geotechnische toepassingen worden in de Nederlandse praktijk uitgevoerd met een beperkt aantal systemen. In NEN 5119 staan de verschillende boorsystemen vermeld met de eisen die moeten worden gesteld aan de uitvoering hiervan.

De meest toegepaste systemen (zie hoofdstuk 5) zijn:

- Handboringen
- Begemannboringen
- Avegaarboringen
- Zuigboringen
- Pulsboringen
- Sonische boringen
- Spoelboringen

Alle genoemde systemen, met uitzondering van sonisch boren, zijn, met hun toepassing en dieptebereik, vermeld in genoemde norm. De vereiste monsterkwaliteit

is afhankelijk van de geotechnische parameters die moeten worden bepaald, zoals sterkte, stijfheid of samenstelling. Klasse 1 stelt de hoogste eisen en klasse 5 de laagste.

Klasse grondmonsters	Grondmonsters geschikt voor de bepaling van de volgende eigenschappen
1	Vormveranderingeigenschappen
1	Sterkte-eigenschappen
1	Consolidatie-eigenschappen
1, 2	Gelaagdheid
1, 2	Waterdoorlatendheid
1, 2	Poriëngehalte
1, 2	Volumieke massa
1, 2, 3	Vochtgehalte
1, 2, 3, 4	Gehalte aan organische bestanddelen
1, 2, 3, 4	Volumieke massa vaste delen
1, 2, 3, 4	Minimum en maximum dichtheid
1, 2, 3, 4	Consistentiegrenzen
1, 2, 3, 4	Korrelverdeling
1, 2, 3, 4	Bepaling van de grondsoort
1, 2, 3, 4, 5	Laagwisselingen

Tabel 10.3: Klasse-indeling grondmonsters in relatie tot de te bepalen eigenschappen

In NEN 5119 zijn de diverse monsternametechnieken beschreven, waarbij afhankelijk van de grondsoort, bodemsamenstelling en vastheid de maximaal haalbare monsterkwaliteit is vermeld. In het algemeen kan worden gesteld dat honderd procent ongeroerde monstername niet mogelijk is. De monsters dienen te worden gestoken met een monstersteekapparaat dat zo weinig mogelijk verstoring veroorzaakt.

In zand is ongeroerde monstername niet eenvoudig, aangezien hier de dichtheid en spanningstoestand snel worden verstoord. De structuur blijft wel goed behouden.

Indien wordt gekozen voor boringen zonder ongeroerde monstername, zal de beschrijving van de bodemlagen alleen op basis van het opgeboorde materiaal kunnen geschieden. De structuur van de grond gaat hierbij verloren.

In Nederland wordt het pulsboorsysteem het meest toegepast in combinatie met ongeroerde monstername met behulp van het Ackermann-steekapparaat. Hierbij wordt een dunwandige steekbus met een diameter van 67 mm of 100 mm in de grond gehamerd (zie hoofdstuk 5). Voor bijzondere omstandigheden worden ook wel ongeroerde monsters genomen met een gedrukt systeem, waarbij onder

bepaalde omstandigheden een hogere monsterkwaliteit kan worden bereikt.

In tabel 10.4 zijn de te behalen monsterklassen gegeven, afhankelijk van het toe te passen monstersteekapparaat.

Type monstersteekapparaat	Dun-/dikwandig	Drukken of hameren	Geschiktheid in grondsoort	Klasse
Open monstersteek apparaat	Dikwandig	Drukken of hameren	Cohesief: zeer slap	2(1)
			Cohesief: slap/matig vast	1
			Cohesief: vast/zeer vast	2(1)
			Niet-Cohesief: boven grondwaterstand	3(2)
Open monstersteek apparaat	Dunwandig	Drukken of hameren	Cohesief	3(2)
			Niet-Cohesief: boven grondwaterstand	4
Open monstersteekapparaat	Dikwandig	Drukken of hameren	Cohesief: slap/vast	2(1)
			Niet-Cohesief: boven grondwaterstand	3(2)
Open monstersteek apparaat	Dunwandig	Drukken of hameren	Alle grondsoorten	4(3)
Zuiger monstersteekapparaat	Dunwandig	Drukken	Cohesief: zeer slap/matig vast	1
			Niet-Cohesief: los/matig vast	3(2)
Zuiger monstersteekapparaat	Dikwandig	Drukken	Cohesief: slap/.matig vast	2(1)
			Niet-Cohesief	4(3)
Begemann- apparaat (66mm)	n.v.t.	Drukken	Cohesief	1
			Niet-cohesief	2
Klasse aangegeven tussen haakjes zijn onder zeer gunstige omstandigheden mogelijk.				
NB. Voor een volledige tabel zie NEN 5119; 1991 Boren en monsterneming in grond; tabel 4 met aanvullende eisen tot diameter monsters en te gebruiken apparatuur.				

Tabel 10.4: Overzicht van monstersteekapparatuur voor monsternamen en te bereiken monsterklasse

Laboratoriumonderzoek

Voor de diverse laboratoriumproeven zal het grondmonster van voldoende kwaliteit moeten zijn (zie tabel 10.4). De meeste proeven zijn genormeerd.

Naast de regels voor de uitvoering in de Nederlandse normen zijn de laboratoria in de meeste gevallen gecertificeerd door middel van een kwaliteitssysteem. Dit wordt regelmatig gecontroleerd door een onafhankelijk instituut, door middel van terugkerende audits. Hierbij wordt gekeken naar diverse aspecten, zoals de uitgevoerde procedures en verslaglegging. Deze zijn vastgelegd in het kwaliteitshandboek van het bedrijf. In de Nederlandse praktijk zijn dit certificeringen volgens het ISO 9001 systeem. Naast het ISO 9001 systeem zijn er ook bedrijven waarvan het

kwaliteitssysteem van het laboratorium voldoet aan criteria volgens de Raad van Accreditatie, gebaseerd op NEN-EN-ISO/IEC 17025. Bij dit systeem worden specifieke eisen gesteld aan laboratoriumprocedures.

Voor laboratoriumproeven zijn ook in Europees verband documenten opgesteld, waarin de uitvoering is beschreven. Vooralsnog zullen deze documenten niet als norm worden uitgebracht maar als technische specificatie. Publicatie hiervan wordt eind 2009 verwacht.

Het optimale onderzoek

NEN-normen bewaken de minimale kwaliteit van het onderzoek. Wie streeft naar een optimale kwaliteit, hoeft zich natuurlijk niet tot de norm te beperken. Extra metingen die niet vanuit de huidige regelgeving NEN 5140 worden vereist, kunnen de kwaliteit van het onderzoek aanzienlijk verhogen.

Dit geldt bijvoorbeeld voor het meten van de waterspanning tijdens het sonderen. De resultaten hiervan vormen een belangrijke extra informatiebron voor de interpretatie van de bodemopbouw. Door combinatie van de meting van de conusweerstand, de plaatselijke wrijvingsweerstand en de waterspanning, wordt optimaal gebruik gemaakt van de sondeertechniek.

Ook kan bij sonderingen een piëzoconus worden gebruikt, voor het detecteren van dunne cohesieve laagjes in een zandpakket en dunne zandlaagjes in een kleipakket. Deze zijn vaak slecht zichtbaar door het uitmiddelingseffect in de conusweerstand en de plaatselijke wrijvingsweerstand. Deze laagjes kunnen van groot belang zijn, zowel voor het zettinggedrag van funderingen als voor de verticale (on)doorlatendheid ten behoeve van geohydrologische berekeningen.

Een zogenaamde dissipatietest (zie hoofdstuk 4) geeft een goed beeld van de heersende waterspanning en de stijghoogte in doorlatende gronden. In vaste lagen kan men met behulp van deze test een indicatie over de (on)doorlatendheid van deze grondlagen krijgen.

De effectieve conusweerstand kan worden bepaald door te compenseren voor de gemeten waterdrukken en rekening te houden met de effectieve oppervlakte van de conuspunt. Hierdoor wordt een parameter bepaald die onafhankelijk is van het type conus dat gebruikt wordt. Dit is met name van belang voor offshore toepassingen, waarbij in honderden meters waterdiepte wordt gesondeerd.

Ten slotte kan het onderzoek worden geoptimaliseerd door de afstanden tussen de sondeerlocaties te verkleinen. Hiermee worden de onzekerheden teruggebracht in de variaties in bodemgesteldheid en hun invloed op het paalontwerp. Zo kun je voorkomen dat er later lokaal dieper geheid moet worden, of zand opgestort.

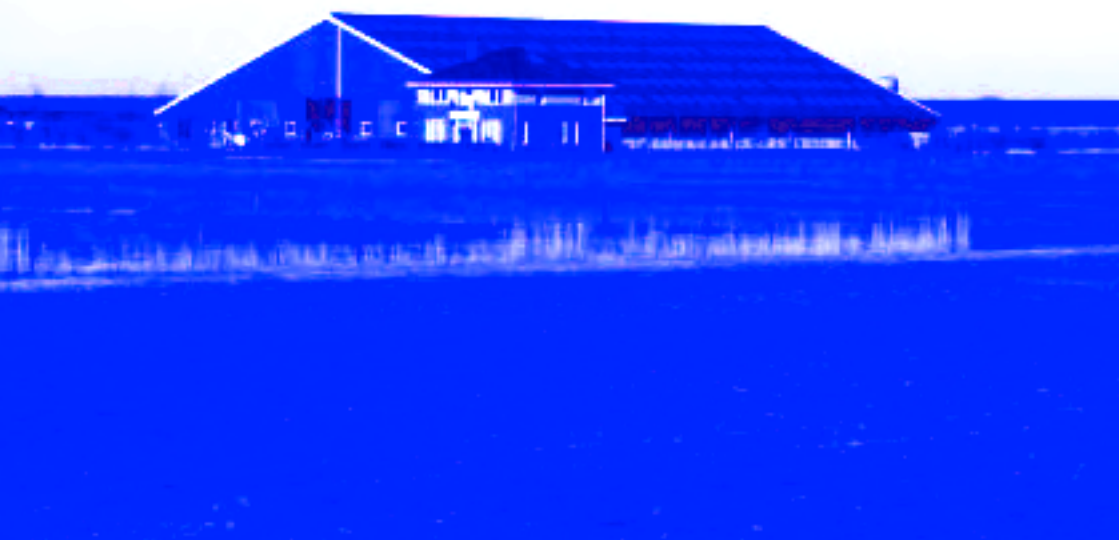
'Geen stuit'

Een adviseur werd geconsulteerd naar aanleiding van schade aan een geheel nieuw gebouwde boerderij met stallen. Eén jaar na de bouw was de boerderij een bouwval en moest worden afgebroken. Wat was er gebeurd? De sonderingen voor de nieuwbouw waren destijds uitgevoerd in een weiland achter de te vervangen oude boerderij. De constructeur kreeg de sondeergrafieken op zijn bureau en rekende op de gebruikelijke wijze de lengte en de schachtafmeting voor een prefab heipaal uit. Enkele maanden later ging de eerste paal de grond in.

Tijdens het heiwerk belde de heier tot twee keer toe de constructeur op, met de mededeling dat hij geen 'stuit' kreeg (hij merkte aan het heien dat de paal niet in hardere grond kwam). Deze keek alles van achter zijn bureau na en zei dat ze door moesten gaan, daar alles in orde leek. Er werd verder gebouwd, maar een jaar later waren de scheuren in de muren van de nieuwe woning en stal zo groot dat je de krant er door kon lezen. Na enig speurwerk bleek dat het sondeerbeeld niet klopte met wat men zou verwachten als men ter plekke geweest was. De eigenaar vond namelijk dat de nieuwbouw te laag zou komen te staan en had de aannemer opgedragen om het terrein eerst ongeveer anderhalve meter op te hogen. Dit alles was gebeurd nadat de sondeerwagen in het veld was geweest.

Omdat het vaste zand ter plaatse over de eerste meter vrij fors in vastheid toeneemt, had de constructeur in zijn ontwerp de palen slechts 0,8 meter in de vaste zandlaag gezet. Door de ophoging waren de palen nu circa 0,7 meter boven de vaste laag aangebracht, nog in het veenpakket. Zettingen van meer dan veertig centimeter waren het gevolg.

Hieruit blijkt dat het belangrijk is om de sonderingen altijd te waterpassen ten opzichte van NAP of een ander referentievlak. Had men dit gedaan en ook het bouwpeil vastgelegd, dan zou deze fout ongetwijfeld zijn voorkomen.





Bodemonderzoek, betaal nu of later véél meer.

11 RISICO'S VERMINDEREN MET BODEM- ONDERZOEK

Regelmatig kan men in krant of vaktijdschrift lezen dat er 'weer' onverwachte schade is opgetreden bij een bouwproject. Dit is vaak onbegrijpelijk voor de gemiddelde burger:

"Ruim 30 jaar geleden stond er al iemand op de maan en anno 2006 zijn ze nog niet in staat om de ondergrond te beheersen..."

De gemiddelde burger heeft echter geen idee van de complexiteit van de ogenschijnlijk eenvoudige Nederlandse bodem. Onze rijke geologische historie als delta met een aantal ijstijden (zie hoofdstuk 2) heeft geleid tot een zeer grillige en vaak verraderlijke ondergrond.

De jaarlijkse faalkosten in alléén al de Grond- Weg en Waterbouw (GWW) worden geschat op 800 miljoen euro. Omdat GWW-projecten per definitie in of op de grond worden uitgevoerd, speelt de ondergrond hierbij een prominente rol. Met andere woorden; honderden miljoenen euro's per jaar aan faalkosten worden direct of indirect veroorzaakt door de bodem. Dit wordt mede veroorzaakt door de typische Nederlandse ondergrond, met zeer slappe grond en zeer hoge en variabele grondwaterstanden.

Volgens schattingen op basis van analyses van een groot aantal projecten, wordt maar liefst 85% van alle grondgerelateerde problemen veroorzaakt door te beperkt en kwalitatief onvoldoende bodemonderzoek. De noodzaak voor risico-



Risicomanagement uit balans

management van de bodem door middel van gestructureerd bodemonderzoek lijkt hiermee een open deur. Hoewel de dagelijkse praktijk vaak anders is.

Wat is risicomanagement?

Risico's zijn ongewenste gebeurtenissen, die het resultaat van een project in ongunstige zin beïnvloeden. Risico's worden vaak uitgedrukt in kansen en gevolgen. Een risico bestaat uit de kans op een ongewenste gebeurtenis en de gevolgen van die ongewenste gebeurtenis. Vaak worden kans en gevolg met elkaar vermenigvuldigd om risico's onderling met elkaar te kunnen vergelijken.

Voorbeelden van risico's die met de bodemgesteldheid te maken hebben zijn:

- Paalbreuk door een onverwacht harde zandlaag – het risico bestaat uit de kans op paalbreuk en de gevolgen in termen van bijvoorbeeld extra kosten en vertraging.
- Te grote eindzettingen door een lokale veenlaag – het risico bestaat uit de kans op de aanwezigheid van een lokale veenlaag en de gevolgen van de te grote eindzettingen, bijvoorbeeld vertraging van de oplevering.
- Taludinstabiliteit door verweking van een onverwacht losgepakte zandlaag, met een ogenschijnlijk 'normale' conusweerstand – het risico bestaat uit de kans op de aanwezigheid van de losgepakte zandlaag en de gevolgen van de taludinstabiliteit, bijvoorbeeld extra kosten en een beschadigd imago.
- Opbarsten van de bouwputbodem, door een te laag ingeschatte grondwaterstand in de onderliggende zandlagen – het risico bestaat uit de kans op de onjuiste inschatting van de grondwaterstand en de gevolgen van de ondergelopen bouwput, bijvoorbeeld vertraging van het werk.
- Te duur ontwerp van een dijk, omdat de sterkteparameters te laag zijn ingeschat – het risico bestaat uit de kans dat de ondergrond sterker is dan aangenomen en het bijbehorende gevolg, dat de opdrachtgever te veel betaalt en/of de aannemer extra winst laat liggen.

Al deze voorbeelden hebben gemeen dat er een negatief effect is op de beheersaspecten tijd, geld, kwaliteit en imago van een project. Ook is het mogelijk dat een kostenoptimalisatie onbenut wordt gelaten, zoals het laatste voorbeeld aangeeft.

Onder geotechnisch risicomanagement verstaan we een gestructureerde aanpak om geotechnische risico's:

- 1 te inventariseren (welke risico's);
- 2 te kwalificeren (hoe groot zijn de risico's);
- 3 te alloceren (voor wie zijn de risico's);
- 4 te beheersen (wat doen we om de risico's acceptabel te maken).



Falend risicomanagement/optimalisatie onbenut gelaten.

De waarde van risicomanagement

In het algemeen wordt slechts een half tot een procent van de totale projectkosten aan bodemonderzoek uitgegeven. Bij problemen met de bodemgesteldheid stijgen de totale projectkosten echter al gauw met twintig, vijftig of zelfs meer dan honderd procent. Onderstaande tabel laat van enkele grote Nederlandse projecten de overschrijdingen in tijd en kosten zien. Daarnaast is er ongetwijfeld nog veel verborgen leed bij een groot aantal kleinere projecten.

Project	Overschrijdingen	
	Tijd	Kosten
Ramspol opblaasbare dam	+ 80 %	Onbekend
Tramtunnel Den Haag	+100 %	+ 90 %
Stormvloedkering Nieuwe Waterweg	+ 50 %	+ 40 %
Spoorweg Baanvak Amsterdam – Utrecht	+ 65 %	+ 25 %

Tabel 11.1 Overschrijdingen van tijd en kosten van enkele grote Nederlandse projecten

Toch zijn er gelukkig ook voorbeelden van projecten waar risicomanagement juist voor forse besparingen heeft gezorgd. Risicogestuurd bodemonderzoek en bijbehorende monitoring leidde bij het traject Sliedrecht – Gorinchem van de Betuwe-route tot een besparing van vier miljoen euro, terwijl de extra bodemonderzoek- en monitoringskosten 200.000 euro bedroegen. Hiermee heeft de investering zichzelf maar liefst twintig maal terug verdiend.

Bij een onderdeel van de Rotterdamse RandstadRail leidde een risicogestuurd bodemonderzoek, bestaande uit in-situ elektrische dichtheidsmetingen en laboratoriumonderzoek, tot een veel goedkoper ontwerp. Wederom een winst van twintig maal de investering.

Een risicogestuurd bodemonderzoek voor de Hubertustunnel in Den Haag bestond onder andere uit cone pressiometertesten (een meetapparaat om ter plaatse de stijfheidseigenschappen van de grond te kunnen bepalen) en triaxiaalproeven, waarmee de samenhang van de grond in het laboratorium werd getest. Dit resulteerde in een twee maal grotere stijfheid van de ondergrond, wat een aanzienlijke besparing aan het ontwerp van de tunnelwand opleverde.

Maar ook voor kleinere projecten loont risicomanagement, bijvoorbeeld voor lokale dijkversterkingen. Zo resulteerde een € 150.000 kostend bodemonderzoek naar de kwaliteit van dijkbekleding tot een besparing van € 1.500.000, omdat een lokaal aanwezige potklei toch geschikt bleek als dijkbekledingsmateriaal.

Ook in het buitenland zijn inmiddels de nodige casestudies voorhanden. Een risicogestuurde aanpak van de relatief kleine Engelse John Pier watertunnel resul-



*Risicomangement met innovatief schuin uitgevoerd in-situ
dichtheidsonderzoek voor RandstadRail.*

teerde in 10% kostenbesparing en 20% tijdsbesparing. Diverse studies geven aan dat risicomanagement relatief eenvoudig tot besparingen van 4 tot 22% van de totale projectkosten kan leiden. Deze besparingen zijn eenvoudiger te realiseren naarmate het risicomanagement eerder in het project wordt toegepast.

Richtlijnen

Bodemonderzoek draait uiteindelijk om drie vragen:

- 1 Welke bodemonderzoekstechnieken moet ik benutten? (sonderingen, boringen, laboratoriumproeven, enzovoort)?
- 2 Hoeveel bodemonderzoek moet ik uitvoeren?
- 3 Welke kwaliteit bodemonderzoek heb ik nodig? (bijvoorbeeld sonderingen volgens NEN 5140 klasse 3, klasse 2 of zelfs klasse 1)?

Hierbij wordt vaak verzucht dat er geen afdoende norm bestaat om deze vragen voor eens en altijd eensluidend te beantwoorden. Uiteraard bestaan er in de literatuur de nodige handige tabelletjes met minimum bodemonderzoek voor bepaalde constructies. NEN 6740 bevat richtlijnen, en ook CUR publicatie 2003-7 Bepaling Geotechnische Parameters.

Men dient zich echter te realiseren dat dit niet meer dan richtlijnen zijn; ze geven richting en niet méér dan dat. De bodem en bouwwerken erop of erin variëren eenvoudigweg te veel om er een algemeen geldende norm voor het optimale bodemonderzoek op los te laten.

Vanuit het oogpunt van risicomanagement dient voor elk project éérs helder te zijn wat de belangrijkste risico's zijn. Vervolgens kan het bodemonderzoek worden afgestemd op deze beheersing van de risico's. De vragen welke bodemonderzoekstechnieken, hoeveel bodemonderzoek en welke kwaliteit bodemonderzoek zijn dus geheel afhankelijk van de risico's van het betreffende project, én de mate waarin betrokkenen de gevonden risico's willen beheersen.

Eenvoudig geotechnisch risicomanagement

Kansen en gevolgen van geotechnische risico's kunnen eenvoudig worden geïnventariseerd en geclassificeerd. Een inventarisatie bestaat uit een opsomming van de mogelijke risico's. Vervolgens kan de grootte van deze risico's globaal worden vastgesteld. Tabel 11.2 geeft hiervoor een mogelijke classificatie, die eenvoudig kan worden aangepast aan het betreffende project.

Op basis van een dergelijke risicoclassificatie kunnen geïnventariseerde risico's op grootte worden 'gescoord'. Tabel 11.3 geeft hiervan een voorbeeld.

Tabel 11.4 geeft aan hoe de gescoorde ondergrondse risico's ten opzichte van elkaar

	RISICO CLASSIFICATIE CRITERIA	SCORE = 0 (criterium draagt niet significant bij aan risico)	SCORE = 1 (criterium draagt wel significant bij aan risico)
	KANS		
1	Kennis over risico	veel kennis beschikbaar	weinig/geen kennis beschikbaar
2	Termijn van optreden	optreden gedurende < 1 maand	optreden gedurende > 1 maand
3	Manier van optreden	chronisch optreden van het risico	acuut optreden van het risico
	GEVOLG		
4	Tijd (planning)	< 1 maand vertraging	> 1 maand vertraging
5	Geld (budget)	< kfl 50000,- extra kosten	> kfl 50000,- extra kosten
6	Kwaliteit, veiligheid, imago	reductie is aanvaardbaar	reductie is niet aanvaardbaar

Tabel 11.2 Voorbeeld van een eenvoudige risicoclassificatie

Stappenplan

Een eenvoudige risicoanalyse kan bestaan uit zeven stappen:

- 1 Uit welke geotechnische constructies bestaat het project (bijvoorbeeld een grondlichaam als wegfundering)
- 2 Welke geotechnische mechanismen zijn van belang voor het optimaal functioneren van de constructie (bijvoorbeeld stabiliteit, zettingen).
- 3 Wat zijn globaal de risico's (kansen en gevolgen) van afwijkingen van de geotechnische mechanismen (bijvoorbeeld de kansen op en gevolgen van grotere zettingen dan gespecificeerd in het Programma van Eisen).
- 4 Bepaal aan de hand van de risico's van stap 3 welke geotechnische mechanismen onzeker én kritisch zijn voor het succes van het project (bijvoorbeeld zettingen).
- 5 Bepaal aan de hand van de kritische mechanismen van stap 4 met welke rekenmethoden deze mechanismen in het ontwerp worden opgenomen.
- 6 Bepaal aan de hand van de rekenmethoden van stap 5 welke parameters kritisch zijn (bijvoorbeeld de deformatieparameters C_c en C_a).
- 7 Bepaal aan de hand van de kritische parameters van stap 6 én de te verwachten geologische variatie van de ondergrond de opzet van het bodemonderzoek: welke bodemonderzoekstechnieken, hoeveel bodemonderzoek en welke kwaliteit bodemonderzoek.

Bovengenoemd stappenplan is in feite een recept dat automatisch leidt tot het optimale bodemonderzoek, op basis van de geotechnische risico's die globaal in kaart zijn gebracht. De aanpak kan uiteraard ook worden benut voor geohydrologische risico's, archeologische risico's en dergelijke.

kunnen worden geplot in een risicomatrix, met op de assen kans en gevolg. De grootste risico's hebben de grootste kansen en gevolgen. De bodemparameters die van invloed zijn op deze risico's verdienen dus de meeste aandacht in het bodemonderzoek, wat betreft welke bodemonderzoekstechnieken, hoeveel bodemonderzoek en welke kwaliteit bodemonderzoek.

Op basis van de resultaten van een risicoanalyse kan er voor worden gekozen om geotechnische risico's als gevolg van een afwijkende bodemgesteldheid expliciet te verdelen tussen opdrachtgever en opdrachtnemer. Hiervoor is in Nederland sinds omstreeks 2000 de methodiek van het zogenoemde Geotechnisch Basis Rapport beschikbaar. In CUR-CROW Aanbeveling 105, Risicoverdeling Geotechniek, is deze methodiek tot een praktisch hulpmiddel uitgewerkt. Hierbij wordt een contractuele afspraak gemaakt over de te verwachten samenstelling van de ondergrond. Een dergelijke afspraak kan discussies en claims over afwijkende bodemgesteldheid tijdens de uitvoering van een project aanzienlijk reduceren. Uiteraard is het zaak om de geïdentificeerde en verdeelde risico's tijdens de voortgang van het project goed te blijven volgen. Monitoring van deze risico's in het veld tijdens de uitvoering is hiervoor een goede methode.

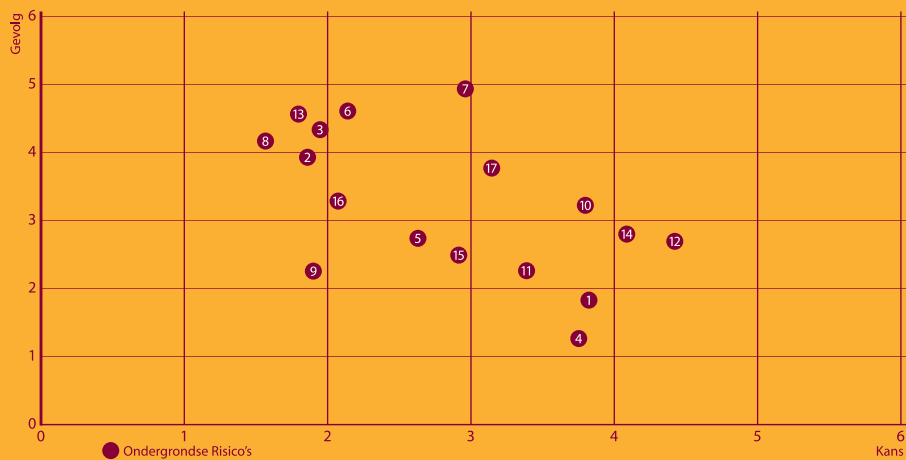
Aan voorgaande benadering komt géén statistiek en waarschijnlijkheidsleer te pas. Het is een hardnekkig en wijdverbreid misverstand dat risicomanagement per definitie ingewikkelde statistiek of probabilistiek betekent. Risicomanagement dient te starten met een globale kwalitatieve benadering, zoals hier gepresenteerd. Deze eenvoudige benadering kost niet veel tijd en is daarom ook op relatief kleine en ogenschijnlijk eenvoudige projecten van toepassing.

De gepresenteerde aanpak kan er wel in resulteren dat er zulke kritische risico's aan het licht komen, dat een probabilistische verdieping loont om meer grip op dit risico te krijgen. Het voert te ver om daar in dit hoofdstuk dieper op in te gaan. CUR publicatie Kansen in de Civiele Techniek geeft hierover een goede inleiding.

NEN 6740 vermeldt één en ander over de rol van statistiek bij het bepalen van rekenparameters. Het komt erop neer dat bij een groter aantal proefresultaten een hogere vermenigvuldigingsfactor voor het bepalen van de representatieve waarde van grondparameters mag worden toegepast. Hierdoor kan worden gerekend met gunstiger parameters, die kunnen leiden tot een lichter en daardoor goedkoper ontwerp en/of een snellere uitvoering van het project.

Nr	Ondergrondse risico's	K-kennis	K-termijn	K-manier	G-tijd	G-geld	G-kwaliteit	K-totaal	G-totaal	Totaal
1	archeologische vondsten	1,57	0,71	1,57	1,43	0,14	0,29	3,85	1,86	5,71
2	horizontale en verticale zettingen	0,38	0,88	0,63	1,00	1,25	1,71	1,89	3,96	5,85
3	geotechnische parameters ongunstiger dan aangenomen	0,50	0,88	0,57	1,38	1,63	1,29	1,95	4,3	6,25
4	bommen en granaten	1,25	0,88	1,63	0,63	0,38	0,29	3,76	1,3	2,06
5	pleistoceen lokaal op dieper niveau dan aangenomen voor paalpunt	0,75	0,40	1,50	0,75	1,00	1,00	2,65	2,75	5,40
6	geotechnisch model niet juist	0,80	0,83	0,50	1,20	1,60	1,83	2,13	4,63	6,76
7	ter beschikking gestelde gegevens onjuist	1,00	1,14	0,83	1,50	2,00	1,43	2,97	4,93	7,90
8	uitgangspunten benodigde draagkracht onjuist	0,20	0,80	0,60	1,20	1,60	1,33	1,60	4,13	5,73
9	ongelijkmatige ondergrond	1,00	0,50	0,40	0,80	0,80	0,60	1,90	2,20	4,10
10	bodemverontreiniging	1,43	1,29	1,14	1,00	1,17	1,00	3,86	3,17	7,03
	<0,5	0,49	0,50							
	>=0,5 & <=1,5	1,00								
	>1,5	1,51	1,50							

Tabel 11.3 Voorbeeld van een lijst met 'gescoorde' ondergrondse risico's

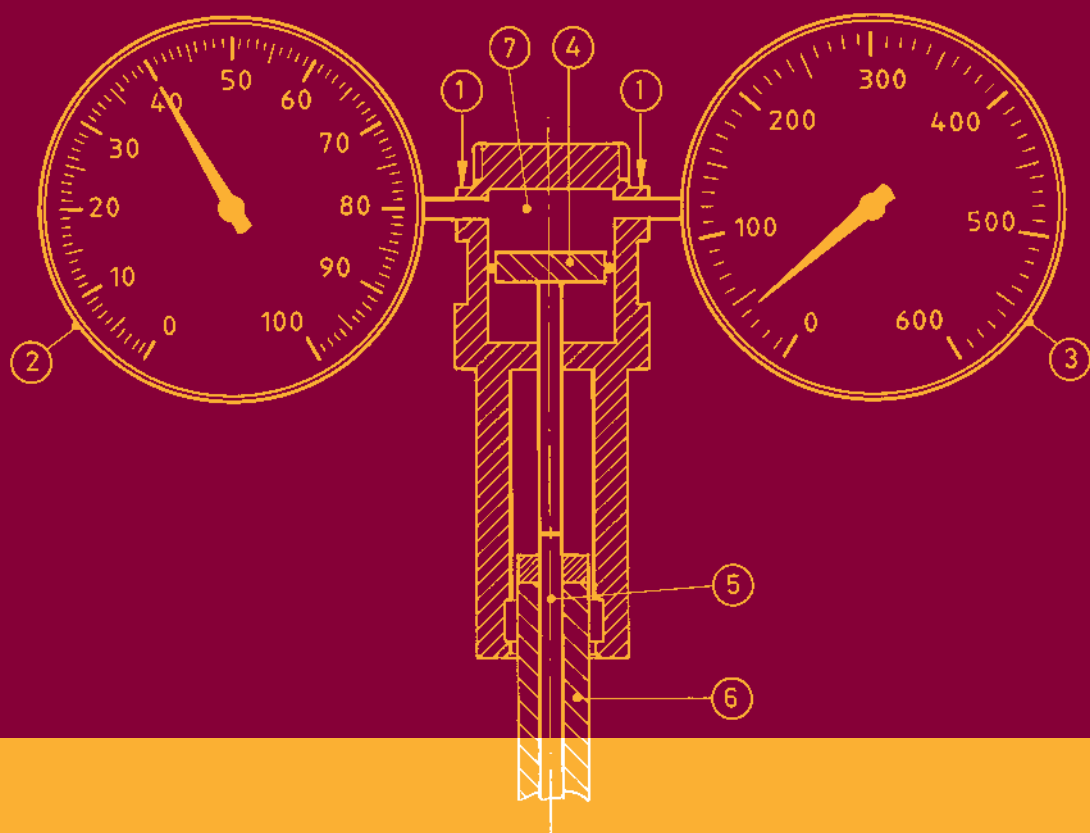


Figuur 11.4 Risicoplot met ondergrondse risico's uitgedrukt in kans en gevolg.

Rijker door rekenen

Er zijn praktijkvoorbeelden bekend waarbij de toepassing van statistiek zeer waardevol bleek. Zo kon voor een rijksweg een talud twee maal zo steil aangelegd worden met dezelfde veiligheid, door gebruik te maken van een aantal laboratoriumproeven en statistiek. Hierbij is een voldoende grote proefverzameling van triaxiaalproeven benut voor het bepalen van sterkteparameters. Dit leidde tot aanzienlijk hogere parameters dan op basis van tabel 1 van NEN 6740 zou mogen worden afgeleid. Het veel steilere talud was buitengewoon welkom voor de opdrachtgever, omdat het de onteigeningsprocedure van de benodigde grond aanzienlijk vereenvoudigde.





Woordenlijst

Ackermann steekapparaat	Boorapparaat waarmee ongeroerde monsters kunnen worden genomen, ontwikkeld door Ackermann.
anhydride	Verbinding die door het verlies van water uit andere stoffen ontstaat.
anhydriet	Anhydride van gips; watervrije, zwavelzure kalk.
Atterbergse consistentiegrenzen	Beschrijven het gedrag van grond en de gevoeligheid bij verwerking bij verschillende watergehaltes.
avegaar	Grote boor met een winding over de volle lengte.
audit	Controle door een onafhankelijke instelling of een bedrijf volgens het vereiste kwaliteitssysteem werkt.
axiaal	De as in lengterichting.
Barendsenapparaat	Oudste sondeerapparaat, in 1932 ontwikkeld door B. Barendsen.
Begemannboring	Boorsysteem waarmee een ongeroerd monster in de volle lengte kan worden genomen, ontwikkeld door B. Begemann.
beddingsconstante	Veerconstante, de relatie tussen vervorming en druk.
belending	Aangrenzende bebouwing of begroeiing.
bronbemaling	Droogmaken van funderingsputten door verlagen van de grondwaterstand.
Carboon	Laatste periode van het Paleozoïcum, 354-290 Ma.
capillaire zone	Grondlaag die grenst aan het grondwaterpeil, en die daardoor geheel verzadigd is met water.
cement-bentonietspoeling	suspensie van cement, bentoniet en water.
concretie	Lens- of bolvormige of onregelmatige klomp van secundair gevormde mineralen in een gesteente.

conductiviteit	Thermische of elektrische geleidbaarheid, mate waarin een stof temperatuur of elektrische stroom geleid.
cone pressiometer testen	Een meetapparaat om ter plaatse de stijfheidseigenschappen van de grond te kunnen bepalen.
conglomeraten	Samengestelde steensoorten.
consolidatiecoëfficiënt	Parameter voor het tijd-zettingsgedrag van grond.
continentale sedimenten	Afzettingen die op het land worden gevormd (i.t.t. mariene).
conus	Kegelvormige stalen punt van een sondeerbuis.
damwandprofiel	Staalprofiel voor een grondkerende constructie.
debiet	Op te pompen hoeveelheid water bij bemaling.
Devoon	Periode 416-354 Ma. Hieruit zijn de oudste afzettingen in de Nederlandse bodem afkomstig.
dilatantie	Volumevergroting van grond door vergroting van de poriën.
dissipatieproef	Test waarbij wordt gemeten hoe lang het duurt voor overspannen water tijdens het sonderen afvloeit en de waterdruk zich weer heeft aangepast.
dolomiet	Kalkgesteente dat bestaat uit calcium- en magnesiumcarbonaat.
doorlatendheidscoëfficiënt	Experimenteel vastgestelde waarde waarmee de stroomsnelheid van water door grondsoorten kan worden berekend.
elasticiteitsmodulus	Verhouding tussen de materiaalspanning en de lineaire vervorming
extensometer	Een ijzeren- of glasfiberstaaf, die met de onderkant in of op de gewenste laag wordt vastgezet. Over het bovenliggende deel is de staaf van een ommanteling voorzien, zodat de grond geen kracht (wrijving) op de staaf kan uitoefenen.
formaties	Afzettingspakketten.
funiculaire zone	Grond die gedeeltelijk verzadigd is met water.
freatische grondwaterstand	Grondwaterspiegel.
geofoon	Apparaat dat trillingen in de grond meet.
grondboring	Het maken van en gat in de ondergrond.
grondslag	Laagopbouw van de ondergrond.

grondroerder	Iemand die graafwerkzaamheden uitvoert/laat uitvoeren.
grondroering	Werkzaamheden uitgevoerd in de bodem.
hydrostatisch	Waterspanning die recht evenredig toeneemt met de diepte.
in situ	Ter plaatse.
ISO	International Standards Organization, de instelling die internationale standaardnormen opstelt, waaronder veiligheidseisen.
Jura	Periode van 205 tot 142 miljoen jaar geleden, vormt samen met het Krijt en Trias het Mesozoïcum.
kalibreren	Regelmatig controleren of een meetinstrument aan de criteria voldoet.
Kenozoïcum	Geologische periode, loopt van 65 miljoen jaar geleden tot heden. Bestaat uit Tertiair en Kwartair.
kleefbreker	Verdikking van de sondeerbuis waardoor de wrijvingsweerstand kleiner wordt, en er dus dieper kan worden gesondeerd.
Krijt	Periode van 142 miljoen jaar geleden tot 65 miljoen jaar geleden. Eindigt met meteorietinslag, waarmee veel leven (waaronder de dinosauriërs) op aarde uitsterft.
Kwartair	Geologische periode waar wij nu inzitten. Loopt van 1,8 miljoen jaar geleden tot heden.
lepelboor	Gutsboor voor het uitvoeren van grondboringen.
magnetometer	Instrument voor het meten van veranderingen in het magnetisch veld, zodat met de aanwezigheid van metalen in de bodem kan detecteren.
mantelconus	Conus voorzien van een kleeflichaam.
mariene sedimenten	Afzettingen die in de zee zijn gevormd.
Mesozoïcum	Geologische periode die loopt van 248 tot 65 miljoen jaar geleden. Bestaat uit het Krijt, het Trias en de Jura.
NEN	Nederlands Normalisatie Instituut. Landelijke instelling die o.a. bouwnormen en normen voor bodemonderzoek opstelt en uit geeft.
open bemaling	Bemaling met vuilwaterpompen, bijvoorbeeld klokpompen
Paleozoïcum	Oudste geologische periode, omvat onder meer het Perm, Carboon en Devoon.

pedulaire zone	Grondlaag die zo ver verwijderd is van het grondwaterpeil, dat er heel weinig water aanwezig is.
peilbuis	Kunststof buis die over de onderste meter geperforeerd is, waarmee de stijghoogte van het grondwater gemeten kan worden.
Perm	Periode van 290 tot 248 miljoen jaar geleden.
plasticiteitsindex	Geeft verwerkbaarheid van de grond aan bij verschillende vochtgehalten (verschil tussen vloeigrens en uitrolgrens).
plaxisberekeningen	Berekeningen met het eindige elementen programma PLAXIS.
poer	Onderdeel van een fundering, bestaande uit een stukmet-selwerk of beton.
poriën	Ruimte tussen grondkorrels, gevuld met water of lucht.
pressiometer	Instrument voor het meten van horizontale grondspanningen.
primaire zetting	Zetting die optreedt onmiddellijk na het aanbrengen van en terreinbelasting
pulsboormethode	Het uitvoeren van een grondboring met behulp van een grondpuls.
pyriet	Een verbinding tussen zwavel en ijzer.
rijkscoördinaten	Coördinaten, aangegeven in het Rijksdriehoeksnet.
schalie	Fijnkorrelig, ingeklonken en verhard sediment dat in regelmatige lagen splijtbaar is, lei.
schijnwaterstand	Grondwaterstand die afwijkt van de freatische waterstand, als gevolg van plaatselijke afwijkingen in de bodemopbouw.
secundaire zetting	Zetting die in de loop der tijd tot stand komt als gevolg van kruip van de grond.
sediment	Afzettingsgesteente of grond, bijvoorbeeld meegevoerd door een rivier of gletsjer.
silt	Slib, benaming voor gronddeeltje kleiner dan 0,063 millimeter.
sondering	Verkenning van de bodem door middel van een metalen buis die in de grond wordt gedrukt.
spudpalenbak	Ponton, die door middel van ankerpalen wordt vastgelegd.

steenzout	Keukenzout dat in de natuur in vaste vorm wordt gevonden.
sterkteparameters	Verzamelnaam voor de hoek van inwendige wrijving, cohesie e.d. van grond.
Tertiair	Periode voorafgaand aan het Kwartair, het geologische tijdvak waar we nu inzitten.
Trias	Geologisch tijdvak van 248 tot 205 miljoen jaar geleden, oudste deel van het Kenozoïcum.
triaxiaalproef	Proef waarbij kan worden gemeten hoe grond op druk vanuit verschillende kanten reageert.
uitrolgrens	Laagste vochtgehalte waarbij grond nog net zijn samenhang behoudt.
veerconstante	De verhouding tussen de kopzakking van een funderingspaal en de paalbelasting.
verhang	Het verschil in grondwaterpeil (verval) gedeeld door de afstand tussen de twee meetpunten.
verval	Verskil in grondwaterpeil tussen twee meetpunten.
vertoeren	Het tijdens het boren verkleinen van de diameter van de boorbuis als grote diepten moeten worden bereikt.
verkenningboringen	Grondboringen om de bodem opbouw te leren kennen.
vinproeven	Torsieproef voor het meten van de ongedraineerde sterkte van grond.
vloeigrens	Uiterste vochtgehalte waarbij grond nog net niet vloeibaar wordt.
volumieke massa	Gewicht van de grond uitgedrukt in kg/m ³ .
vuilwaterpompen	Open bemaling.
zakbaken	Plaat waarop een verticale steel is bevestigd voor het meten van terreinzettingen.
zeefkromme	Diagram waarin de korrelverdeling (naar grootte) van grond wordt gegeven.
zetting	Het lager worden van grond, verzakking.

Ledenlijst VOTB per 1 juni 2008

Beemsterboer Boringen, Bemalingen en Sonderingen bv

Industrieterrein De Veken 10
1716 KE OPMEER
tel.: 0226 - 351860
fax: 0226 - 351092
e-mail: info@beemsterboerbv.com

Bodembelang bv

Zandloper 17
1731 LM WINKEL
tel.: 0224 - 531274
fax: 0224 - 531915
e-mail: d.j.schermer@bodembelang.nl
website: www.bodembelang.nl

Bouw- en Managementservice Nederland bv

Postbus 18
4500 AA OOSTBURG
tel.: 0117 - 371997
fax: 0117 - 376048
e-mail: info@bmned.com
website: www.bmned.com

Conex Therm-X

Postbus 28
6240 AA BUNDE
tel.: 043 - 3653153
fax: 043 - 3653154
e-mail: info@conexploration.com
website: www.conexploration.com

Van Dijk Geo- en Milieutechniek bv

Postbus 29
3454 ZG DE MEERN
tel.: 030 - 6661746
fax: 030 - 6664854
e-mail: vermeer@vandijktech.nl
website: www.vandijktech.nl

Fugro Ingenieursbureau bv

Postbus 63
2260 AB LEIDSCHENDAM
tel.: 070 - 3111200
fax: 070 - 3277091
e-mail: info@fugro-nederland.nl
website: www.fugro-nederland.nl

Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau, MRO/VLG

Postbus 6633
3002 AP ROTTERDAM
tel.: 010 - 4896922
fax: 010 - 4894547
e-mail: info@gw.rotterdam.nl
website: www.gw.rotterdam.nl

Geonius Geotechniek bv

Breinderveldweg 15
6365 CM SCHINNEN
tel.: 046 - 4572670
fax: 046 - 4572679
e-mail: info@geonius.eu
website: www.geonius.eu

Deltares

Postbus 177
2600 MH DELFT
tel.: 015 - 2693850
fax: 015 - 2610821
e-mail: info@deltares.nl
website: www.deltares.nl

Geodrilling bv

Krusemanlaan 32
1701 VM HEERHUGOWAARD
tel.: 0610950137
fax: 072 - 5742370
e-mail: geodrilling@quicknet.nl
website: www.geodrilling.nl

Geomet Bodemonderzoek bv

Postbus 670
2400 AR ALPHEN a/d RIJN
tel.: 0172 - 449822
fax: 0172 - 449823
e-mail: vd.burg@geomet.nl
website: www.geomet.nl

Geo-Supporting bv

Lisserweg 712
2165 AV LISSERBROEK
tel.: 0252 - 416132
fax: 0252 - 416624
e-mail: info@geosupporting.nl
website: www.geosupporting.nl

Goorbergh Geotechniek bv

Postbus 2155
4800 CD BREDA
tel.: 076 - 5220566
fax: 076 - 5211670
e-mail: info@goorberghgeo.nl
website: www.goorberghgeo.nl

Grontmij Oost bv

Afdeling Terreinonderzoek
Kanaal Zuid 290
7364 AJ LIEREN
tel.: 055 - 5068230
fax: 055 - 5064266
e-mail: oost@grontmij.nl
website: www.grontmij.nl

Hei-Team bv

Watertorenweg 4
9269 WP VEENWOUDEN
tel.: 0511 - 472191
fax: 0511 - 476555
e-mail: stap@eurofunderingen.nl
website: www.eurofunderingen.nl

Hoogveld Sonderingen bv

Postbus 3
7640 AA WIERDEN
tel.: 0546 - 671031
fax: 0546 - 671131
e-mail: info@sondeerwagen.nl
website: www.sondeerwagen.nl

Inpijn-Blokpoel Ingenieursbureau bv

Postbus 94
5690 AB SON en BREUGEL
tel.: 0499 - 471792
fax: 0499 - 477202
e-mail: post@inpijn-blokpoel.com
website: www.inpijn-blokpoel.com

Grondboorbedrijf Gebr. Konings bv

Rucphensebaan 39
4706 PH ROOSEDAAL
tel.: 0165 - 534969
fax: 0165 - 562507
e-mail: gebr.konings@planet.nl

Lankelma Geotechniek Beemster bv

Postbus 712
1440 AS PURMEREND
tel.: 0299 - 433316
fax: 0299 - 439826
e-mail: info@lankelma-geo.nl
website: www.lankelma-geo.nl

Lankelma Geotechniek Almelo bv

Edisonstraat 2
7601 PS ALMELO
tel.: 0546 - 532074
fax: 0546 - 531659
e-mail: info@lankelma-almelo.nl
website: www.lankelma-almelo.nl

Lankelma Geotechniek Zuid bv

Postbus 38
5688 ZG OIRSCHOT
tel.: 0499 - 578520
fax: 0499 - 578573
e-mail: info@lankelma-zuid.nl
website: www.lankelma-zuid.nl

Mos Grondmechanica bv

Postbus 801
3160 AA RHOON
tel.: 010 - 5030200
fax: 010 - 5013656
e-mail: info@mosgeo.com
website: www.mosgeo.com

Ockhuizen Grondmechanica bv

Postbus 9
5710 AA SOMEREN
tel.: 0493 - 499398
fax: 0493 - 479408
e-mail: info@ockhuizen.nl
website: www.ockhuizen.nl

De Ruiter Boringen en Bemalingen bv

Postbus 14
1160 AA ZWANENBURG
tel.: 020 - 4072100
fax: 020 - 4072114
e-mail: info@bam-it.nl
website: www.deruiterhalfweg.nl

Van der Straaten**Aannemingsmaatschappij bv**

Postbus 5
4417 ZG HANSWEERT
tel.: 0113 - 382510
fax: 0113 - 383404
e-mail: info@vd-straaten.nl
website: www.vd-straaten.nl

Tjaden Adviesbureau voor**Grondmechanica bv**

Postbus 252
1440 AG PURMEREND
tel.: 0299 - 411027
fax: 0299 - 411017
e-mail: info@tjaden-grondmechanica.nl
website: www.tjaden-grondmechanica.nl

Van Tongeren Bronbemaling bv

Zwaansprengweg 9
7332 BE APELDOORN
tel.: 055 - 3661533
fax: 055 - 3670693
e-mail: info@henkvantongeren.nl

Wiertsema & Partners bv

Postbus 27
9356 ZG TOLBERT
tel.: 0594 - 516864
fax: 0594 - 516479
e-mail: info@wiertsema.nl
website: www.wiertsema.nl

Wiha Grondmechanica bv

Marconistraat 2
2809 PD GOUDA
tel: 0182 - 585503
fax: 0182 - 585301
e-mail: info@wiha.nl
website: www.wiha.nl

IJB Geotechniek bv

Postbus 210
8530 AE LEMMER
tel.: 0514 - 568800
fax: 0514 - 568807
e-mail: geotechniek@ijbgroep.nl
website: www.ijbgroep.nl

Secretariaat VOTB

Meerkoeteiland 20
2251 WV VOORSCHOTEN
tel.: 06 - 25087250
e-mail: info@votb.nl
website: www.votb.nl