

rapportage

Handreiking
grondonderzoek
voor Piping

inhoudsopgave



Samenvatting	3	A. Boringen	28
1. Inleiding	5	A1. Slugtesten & boorgattechnieken	30
1.1 Context	5	A2. Doorlatendheidsmeting (laboratorium)	31
1.2 Doelstelling en kader	5	A3. Korrelverdelingen (laboratorium)	32
1.3 Leeswijzer	6		
1.4 Totstandkoming	6	B. Sonderingen	34
		B1. HPT sondering en (A)MPT (anisotrope) Mini-pompproef	36
2. Relevante parameters	9	B2. Dissipatietest	37
2.1 Algemeen	9	B3. Verticale glasvezel T-meting	38
2.2 Parameters	9		
2.3 Overige parameters	9	C. Geohydrologisch	40
		C1. Infiltrometerproeven	41
3. Grondonderzoekstechnieken	11	C2. Peilbuismeetnet	42
		C3. Pompproef	43
4. Detailniveau grondonderzoek	15		
		D. Geofysisch	44
5. Ruimtelijke variatie van parameters	17	D1. Elektromagnetische meting	45
		D2. Grondradar	46
6. Voorbeelden omvang en afstanden grondonderzoek	19	D3. Elektrische weerstandsmeting	47
6.1 Grondonderzoeksafstanden op projectbasis bepalen	19	D4. Lekdetectie (SP, AL, DTS)	48
6.2 Grondonderzoek voor een eenvoudige pipinganalyse	20	D5. Lekdetectie (TIR, radiometrie)	49
6.3 Grondonderzoek voor een gedetailleerdere piping analyse	22	D6. Reflectie seismiek	50
		D7. Multikanaal analyse van oppervlaktegolven	51
		D8. Gammastralingssensor	52
7. Literatuurlijst	27	E. Correlatielengten en variatiecoëfficiënten	54
		E.1 Achtergrond bij ruimtelijke variatie	55
		E.2 Deklaagdikte	56
		E.3 Verticale doorlatendheid deklaag	57
		E.4 Volumegewicht deklaag	58
		E.5 Korrelverdeling van de zandlaag (D70)	59
		E.6 Zandlaagdikte	60
		E.7 Doorlatendheid zandlaag (k_z)	61
		Bijlagen	64



Samenvatting

Binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) bestaat op dit moment een forse opgave ten aanzien van versterkingen. Een van de ontwerpbepalende faalmechanismen binnen deze versterkingen is piping. Om deze reden is de Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV-P) opgezet. Hierbinnen worden projecten uitgevoerd waarbij gezocht wordt naar kennisontwikkeling over het faalmechanisme, innovatieve meettechnieken en innovatieve maatregelen.

Binnen de POV Piping is in verschillende verkenningen onderzoek gedaan naar de ruimtelijke variatie van de diverse ontwerp- en beoordelingsparameters, zoals doorlatendheid, korrelgrootte en deklaagdikte. Voor deze verkenningen zijn in Nederland gangbare en in ontwikkeling zijnde grondonderzoekstechnieken gebruikt. In deze handreiking wordt een overzicht gegeven van deze en andere grondonderzoekstechnieken die nuttig zijn voor het bepalen van relevante parameters voor opbarsten, heave en piping, zodat de beschikbare kennis toegankelijk wordt voor het bredere werkveld. Dit overzicht bevat een beschrijving van de techniek, de aanbevelingen voor het plannen, het uitvoeren en het uitwerken van de betreffende meting. Tevens worden er per techniek voor- en nadelen benoemd en wordt er een indruk gegeven van de relatieve kosten van meettechnieken.

Daarnaast zijn de bevindingen ten aanzien van afstanden tussen onderzoekspunten uit bovengenoemde onderzoeken in deze handreiking samengebracht. Op basis hiervan wordt een voorbeeld gegeven voor een grondonderzoeksplan voor een eenvoudige en voor een meer gedetailleerde pipinganalyse. Tevens wordt aangegeven op welke wijze de lezer zelf op projectschaal de minimaal vereiste onderzoeksafstanden kan bepalen.

Belangrijk is te realiseren dat in de praktijk ook grondonderzoek voor andere faalmechanismen nodig is. Integratie van dit plan met grondonderzoek voor andere doeleinden is daarmee noodzakelijk.



1. Inleiding

Deze handreiking geeft een overzicht van de in Nederland gangbare en in ontwikkeling zijnde grondonderzoekstechnieken die gebruikt kunnen worden bij pipingvraagstukken, en afstanden tussen onderzoekspunten. Hierbij is zowel de ervaringskennis uit beoordelings- en versterkingsprojecten als de POV Piping zo veel mogelijk ontsloten.

1.1 Context

Binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) bestaat op dit moment een forse opgave ten aanzien van versterkingen. Een van de ontwerpbepalende faalmechanismen binnen deze versterkingen is piping. Om deze reden is de Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV-P) opgezet. Hierbinnen worden projecten uitgevoerd waarbij gezocht wordt naar kennisontwikkeling over het faalmechanisme, innovatieve meettechnieken en innovatieve maatregelen.

Binnen en buiten de POV Piping is, en wordt, er kennis ontwikkeld. Een risico is dat die kennis blijft hangen bij de direct betrokkenen bij een verkenning, beoordeling of versterking. Uiteraard is het wenselijker dat de kennis verspreid wordt, zodat binnen alle projecten in Nederland gebruik gemaakt kan worden van de kennis die in de loop der jaren is opgedaan. Dat vraagt om kennisdeling. Om hieraan invulling te geven, worden vanuit de POV Piping Synthesedocumenten/Handreikingen opgesteld over de volgende onderwerpen:

- Grondonderzoek; dit betreft voorliggend document.
- Schematiseren en analyses; in voorbereiding.
- Monitoring; in voorbereiding.

1.2 Doelstelling en kader

In de Nederlandse waterkeringsliteratuur is veel te vinden over grondonderzoek, bijv. [1]. Buiten het werkveld van de Nederlandse waterkeringen is nog aanzienlijk meer literatuur beschikbaar (buiten de scope van dit document), waardoor er aan kennis geen gebrek lijkt. Toch worden veel technieken maar beperkt toegepast, terwijl de pipinganalyses hiermee wel degelijk naar een realistischer niveau kunnen worden getild. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door onvoldoende kennisoverdracht. Er wordt weleens gedacht dat 'nieuwe' of minder bekende technieken kostenintensief zijn. Ook wordt zo nu en dan vernomen dat men bevreesd is dat een minder bekende techniek niet wordt geaccepteerd in bijvoorbeeld een beoordeling of ontwerp. Daarnaast leidt het minder toepassen van een techniek tot onbekendheid met deze techniek, waardoor de drempel voor toepassing weer hoger wordt.

Om dit te ondervangen is voorliggend document opgesteld. Met dit document wil de POV Piping een overzicht geven van grondonderzoekstechnieken die geschikt zijn voor pipinganalyses bij Nederlandse waterkeringen. Tevens wordt hierbij ingegaan op aspecten als het opzetten van een meetplan, kosten, toepassingseisen, situaties waarin de techniek minder geschikt is en aandachtspunten bij uitwerking en interpretatie. Hierbij wordt niet beoogd om per techniek een uitvoerige technische beschrijving, inclusief uitzonderingen, speciale situaties en alternatieve

toepassingswijzen, te geven. De lezer die in dat detailniveau in een techniek geïnteresseerd is, wordt geadviseerd de ruim beschikbare (internationale) literatuur hierover te raadplegen.

Op basis van bovenstaande kan de doelstelling van dit synthesedocument als volgt worden beschreven:

De in Nederland beschikbare kennis over de grondonderzoekstechnieken die nuttig zijn voor de veiligheidsbeoordeling van de faalmechanismen opbarsten, heave en piping toegankelijk te maken voor het bredere werkveld.

Het voorliggende document beoogt specifiek de kennis ten aanzien van grondonderzoek in relatie tot het faalmechanisme piping te ontsluiten. Er wordt nadrukkelijk niet in detail ingegaan op de vertaling van grondonderzoek naar een schematisering en analyse van het pipingvraagstuk. Voor dit wordt verwezen naar het separaat hiertoe opgestelde synthesedocument.

Vraagstukken rondom de monitoring van grondwaterstanden en stijghoogten, en afleiding van geohydrologische parameters en randvoorwaarden hieruit, worden in dit document slechts op hoofdlijnen behandeld. Een nadere uitwerking met betrekking tot de monitoring zal worden opgenomen in een separaat synthesedocument.

Om een overzicht van grondonderzoekstechnieken te bieden dat zo compleet mogelijk is, en dus voor de meeste projecten als startpunt kan worden gebruikt, is ervaringskennis verzameld door het afnemen van interviews met professionals die betrokken zijn bij de verkenningen van de POV Piping en/of anderszins betrokken zijn bij grondonderzoek in relatie tot piping.

Belangrijk is te realiseren dat in de praktijk ook grondonderzoek voor andere faalmechanismen nodig is. Integratie van dit plan met grondonderzoek voor andere doeleinden is daarmee noodzakelijk.

1.3 Leeswijzer

De volgende onderwerpen worden in dit document behandeld:

- de benodigde parameters (hoofdstuk 2);
- technieken die binnen het werkveld in gebruik zijn (hoofdstuk 3);
- relatieve kosten van technieken (hoofdstuk 3);
- toegevoegde waarde van technieken binnen verschillende projectfasen (hoofdstuk 4);
- typische geologische variatielengten (hoofdstuk 5);
- mogelijke meetconfiguraties en meetafstanden (hoofdstuk 6)
- ervaringskennis van professionals (verwerkt in de handreiking zelf en factsheets per techniek);
- beperkingen, kansen en tips- en tricks bij technieken (verwerkt in de handreiking zelf en factsheets per techniek).

1.4 Totstandkoming

Dit document is opgesteld door de projectgroep van de POV Piping - Verkenning Heterogeniteit. Daarnaast is gebruik gemaakt van informatie die is beschreven in rapportages van de diverse separate POV Piping verkenningen. De betrokken onderzoekers worden hartelijk bedankt voor hun bijdrage.

De volgende personen zijn apart voor dit document geïnterviewd:

J. Boesveld	Fugro Nederland Land B.V., senior meettechnicus geomonitoring
ir. J.T.M. van der Sande	Waterschap Scheldestromen, beleidsmedewerker waterkeringen
P.A. van de Velde	Fugro Nederland Land B.V., hoofdlaborant
ing. R. Koopmans	Arcadis Nederland B.V., senior adviseur waterkeringen

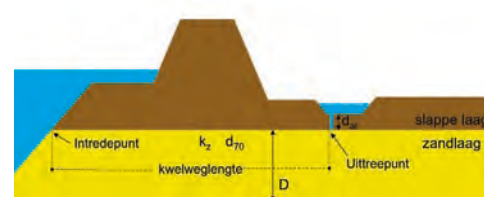
In de projectgroep zaten de volgende personen:

drs. B.M. Berbee	Fugro Nederland Land B.V., auteur/eindredactie
dr. ir. V. van Beek	Stichting Deltares, projectbegeleidingsgroep
dr. A.P. Wiersma	Stichting Deltares, projectbegeleidingsgroep
ir. F. Fennis	Fugro Nederland Land B.V., auteur
ir. G.R.P. van Goor	Fugro Nederland Land B.V., review
ir. J.J. Heerema	Rijkswaterstaat, projectbegeleidingsgroep, review
dr. M.P. Hijma	Stichting Deltares, projectbegeleidingsgroep
ing. R. Koopmans	Arcadis Nederland B.V., projectbegeleidingsgroep, review
ir. J. Niemeijer	Arcadis Nederland B.V., projectbegeleidingsgroep
drs. L. Taal	Waterschap Rivierenland, projectbegeleidingsgroep, review
ing. L.J.H.M. Vergeldt	Waterschap Aa en Maas, review
ir. H. Weijers	Hoogheemraadschap van Rijnland, projectbegeleidingsgroep





2. Relevante parameters



Figuur 1 Pipinggevoelige bodemopbouw met sleutelparameters

Het mechanisme piping omvat een aantal faalmechanismen die in succesievelijke volgorde optreden: opbarsten, heave en piping (terugschrijdende erosie). De weerstand van het systeem tegen het optreden van deze faalmechanismen en daarmee de kans op falen van de kering wordt bepaald door een aantal sleutelparameters. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de parameters.

2.1 Algemeen

Het faalmechanisme piping vormt bij dijken alleen een gevaar indien er sprake is van een pipinggevoelige situatie. Hiermee wordt bedoeld dat de bodemopbouw zo is dat terugschrijdende erosie kan optreden.

De elementen die hiervoor kenmerkend zijn, zijn beschreven in de schematiseringshandleiding Piping [2]. In sommige gevallen zijn er grondformaties die niet gevoelig zijn voor piping. Men kan een eerste indruk verkrijgen van de piping gevoeligheid van een grondformatie door de watervoerendheid van de zandlaag te meten met bijvoorbeeld een HPT sondering of een waterspanningssondering. Een slechte watervoerendheid betekent dat een zandmeevoerende wel zich niet kan ontwikkelen, waardoor piping niet mogelijk is.

Een voorbeeld van een typische pipinggevoelige bodemopbouw is weergegeven in figuur 1. Hierbij is een slappe laag (ook wel de afdeklaag) te zien boven op een zandlaag. Op het moment dat deze opbarst (faalmechanisme 1), kan het water zand naar het maaiveld voeren (heave; faalmechanisme

2). Dit kan zich uitbreiden onder de dijk (piping, faalmechanisme 3), wat uiteindelijk kan leiden tot een open verbinding tussen het buitenwater en het uittredepunt (punt van opbarsten). In het Onderzoeksrapport 'Zandmeevoerende wellen' [1] is een gedetailleerdere beschrijving te vinden van de faalmechanismen opbarsten, heave en piping.

2.2 Parameters

In de vorige paragraaf zijn kort de faalmechanismen genoemd die een rol spelen in het mechanisme piping. Om te bepalen of piping een rol speelt, moeten er meerdere parameters bepaald worden door middel van grondonderzoek. In figuur 1 is naast de typische bodemopbouw die pipinggevoelig is, ook aangegeven welke sleutelparameters meespelen in het mechanisme piping. Daarnaast zijn alle parameters die een rol spelen in het mechanisme piping gepresenteerd in tabel 1. Voor een beschrijving van de parameters wordt verwezen naar de schematiseringshandleiding Piping [2].

2.3 Overige parameters

Naast de besproken parameters spelen ook andere grondparameters incidenteel een rol, bijvoorbeeld relatieve dichtheid en belastingspreiding in geval van watergangen ([3] 10.2(a)). Deze laatste parameter wordt bij onderzoek naar piping veelal afgeleid van andere grondeigenschappen, bijvoorbeeld op basis van de bodemsamenstelling. Relatieve dichtheid wordt voor piping meestal niet separaat onderzocht en wordt daarom in dit document niet verder behandeld. Geometrie van het dijkprofiel is daarnaast ook een relevante parameter, welke echter in dit document niet losstaand behandeld wordt; deze parameter wordt voor eigenlijk alle sporen gebruikt, veelal ingemeten op basis van landmeting (puntmetingen of oppervlaktmetingen, zoals laseraltimetrie). Daarnaast spelen parameters als grondwaterstanden en slootpeilen eveneens een rol.

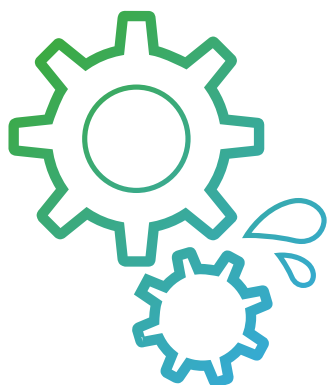
Parameter	Omschrijving	SI-eenheid
Laagopbouw	Gelaagdheid binnen de deklaag en zandlaag	[-]
d_{vl}	Dikte van de afdeklaag in het voorland	[m]
d_{al}	Dikte van de afdeklaag in het achterland	[m]
$k_{v,vl}$	(Verticale) doorlatendheid van de afdeklaag van voorland	[m/s]
$k_{v,al}$	(Verticale) doorlatendheid van de afdeklaag van achterland	[m/s]
D	Dikte van de zandlaag	[m]
$k_{h,z}$	(Horizontale) doorlatendheid van de zandlaag	[m/s]
$k_{v,z}$	(Verticale) doorlatendheid van de zandlaag	[m/s]
Y_{sat}	(Verzadigd) volumegewicht van de afdeklaag	[kN/m ³]
D70	70-percentielwaarde van de korrelverdeling in de zandlaag	[m]

Tabel 1 Overzicht van parameters die door grondonderzoek worden verkregen



3. Grondonderzoekstechnieken

In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van in Nederland in gebruik zijnde onderzoekstechnieken. Daarnaast worden de technieken in de bijlagen verder toegelicht door middel van factsheets.



In tabel 2 is een overzicht gegeven van de grondonderzoekstechnieken die gebruikt kunnen worden bij het bepalen van de relevante parameters die in hoofdstuk 2 genoemd zijn.

Per grondonderzoekstechniek is in de bijlage een gedetailleerd factsheet opgenomen die o.a. ingaat op de volgende aspecten:

- Alternatieve namen of varianten van de techniek.
- Parameters die ermee bepaald worden. Dit kan zijn via correlatie (bijvoorbeeld doorlatendheid via een korrelverdeling). Tevens is aangegeven of een techniek bij uitstek geschikt is om een bepaalde parameter met relatieve eenvoudige inspanning of tegen lage kosten in beeld te brengen. In dat geval wordt deze als voorkeursmethode aangemerkt.
- Ontwikkelingsstatus van de techniek; is deze nieuw, uitontwikkeld of de standaard.
- Relatieve kosten van de techniek; van relatief goedkoop in verhouding tot andere technieken die deze parameter in beeld brengen € tot relatief duur €€€. Hierbij is ervan uitgegaan dat enkele kilometers dijk onderzocht moeten worden.
- Beschrijving van de techniek inclusief specifieke aspecten in relatie tot piping onderzoek.
- Aandachtspunten in planvorming, uitvoering en interpretatie van de meting.
- Belangrijke voor- en nadelen per techniek.
- Doorzicht naar toekomstige ontwikkelingen in de techniek.

De volgende geofysische grondonderzoekstechnieken zijn niet opgenomen in de tabel, omdat traditioneel onderzoek (bijvoorbeeld boringen en sonderingen) vaak reeds redelijk goede informatie biedt:

- Reflectie seismiek
- Meerkanaals analyse van oppervlaktegolven
- Gammastralingssensor

Voor de volledigheid hebben deze technieken wel een factsheet.

Grondonderzoekstechnieken

	Parameters								Kosten
	Dikte deklaag d	Laagopbouw deklaag L-D	Volumegewicht deklaag γ	Doorlatendheid deklaag $k_{v,p}$	D70 top zandlaag	Dikte zandlaag D	Laagopbouw zandlaag L-Z	Doorlatendheid zandlaag $k_{v,z}$	
A. Boortechnieken									
A. Boring (handmatig) 1)	X	X	C	C	C				€
A. Boring (mechanisch) 1)	X	X	C	C	C	X	X	C	€€
A1. Slugtesten & boorgattechnieken)								X	€+ boorkosten
A2. Doorlatendheidsmeting (laboratorium)				X				X	€+ boorkosten
A3. Korrelverdelingen					X			C	€+ boorkosten
B. Sondeertechnieken									
B. Sondering met waterspanning	X	C	C	C		X	X		€
B1. HPT sondering en MPT Mini-pompproef							X	X	€€
B2. Dissipatietest				X				X	€
B3. Verticale glasvezel T-meting							X	X	€€€
C. Specifieke geohydrologische metingen									
c1. Infiltrometerproeven				X					€€
c2. Peilbuismeetnet				X				X	€€€
c3. Pompproef				X				X	€€€
D. Geofysische technieken									
D1. Elektromagnetisch (EM)	X	X							€
D2. Grondradar (GPR)	X								€
D3. Elektrisch weerstand	X	X				X	X		€€€
D4/D5. Lekdetectie technieken	Lekdetectie techniek								

Tabel 2 Overzicht grondonderzoekstechnieken voor piping

X
Voorkeursmethode voor bepaling parameter op basis van verhouding kwaliteit en kosten.

X
Methode voor bepaling parameter, maar met veel aandachtspunten (niet noodzakelijkerwijs nauwkeurig/betrouwbaar of sterk beperkt toepassingsgebied).

C
Geen direct bepaling parameter, correlatiemethode .

€, €, €€
Kosten voor een project met enkele kilometers dijk lengte, respectievelijk relatief goedkoop tot relatief duur.

1)
Het is van groot belang dat boorgaten na het onderzoek goed afgedicht worden.



4. Detailniveau grondonderzoek

Afhankelijk van de projectfase waarin het grondonderzoek moet worden uitgevoerd, wordt een bepaald niveau van informatie vereist. In dit hoofdstuk wordt een voorbeeld gegeven van het grondonderzoek dat gebruikelijk is in een bepaalde projectfase.

Grondonderzoek wordt bijna altijd gefaseerd uitgevoerd. Gaandeweg de beoordelingen en/of het ontwerp blijkt welke informatie voor de beoordeling of versterking van de betreffende kering van belang is. Daarnaast vereist het detailniveau van bijvoorbeeld een beoordeling of ontwerp eveneens een bepaalde diepgang van het grondonderzoek. Met name bij het ontwerp kan ook de wijze van aanbesteding randvoorwaarden opleggen aan de diepgang. Tabel 3 geeft de detailniveaus die te onderscheiden zijn. Hierbij wordt opgemerkt dat de grens tussen gedetailleerd en maatwerk in de praktijk niet scherp is. Ook is niet elke situatie hetzelfde, waardoor deze volgorde niet in elk project kan worden aangehouden. In enkele situaties zal het nodig zijn om meer grondonderzoek in de eerste fase te doen, bijvoorbeeld wanneer het benodigde ruimtebeslag vastgelegd moet worden.

Bovenstaande suggestie voor onderzoeksniveaus is met zorg samengesteld. Er is onderscheidt gemaakt tussen eenvoudig, gedetailleerd en twee typen Toets op Maat (type 1 en type 2). Type 1 betreft technieken die reeds enkele keren zijn toegepast en waarvan bekend is dat deze in veel gevallen meer informatie oplevert. Type 2 betreft technieken die zelden, of met ernstig wisselend resultaat, zijn ingezet voor piping vraagstukken. Voor alle technieken geldt dat voorafgaand aan inzet bekeken moet worden of het onderzoek naar verwachting afdoende oplevert, maar voor de technieken uit het detailniveau Toets op Maat 2 geldt dit met nadruk.

Detailniveau analyse	Ontwerp	Typisch grondonderzoek (factsheet nummer)
Eenvoudig	Schetsontwerp	Bureaustudie, boringen (A), sonderingen (B)
Gedetailleerd	Voorontwerp	Als eenvoudig, maar aangevuld met <ul style="list-style-type: none"> • korrelverdelingen; • volumegewichten; • geofysisch onderzoek deklaag (Elektromagnetische meting (D1), grondradaronderzoek (D2))
Toets op maat 1	Definitief ontwerp Uitvoeringsontwerp	Als gedetailleerd, maar aangevuld met: <ul style="list-style-type: none"> • doorlatendheidsonderzoek (HPT-(A)MPT sonderingen (B1), pompproeven (C3), peilbuismeetnetten (C2)), intredeweerstand voorland & responsmetingen (infiltratieproeven (C1), peilbuismeetnetten (C2)); • onderzoek deklaagdikte en weerstand strangen/geulen, wielen en plassen (geofysisch onderzoek (Elektromagnetische meting (D1), grondradaronderzoek (D2), boringen (A), sonderingen (B) vanaf het water; • Evt. lekdetectie (D4 en D5)
Toets op maat 2	Definitief ontwerp	Zeer specialistische technieken, zelden gebruikt voor piping onderzoek: <ul style="list-style-type: none"> • Reflectie seismiek (D6), alternatief sonderen/boren • Multikanaal analyse (D7), alternatief sonderen/boren • Gammastralingsonderzoek (D8), alternatief handboringen met laboratoriumonderzoek

Tabel 3 Detailniveaus met typisch grondonderzoek

Het grondonderzoek voor piping is veelal gericht op het verkrijgen van informatie over de ondiepe ondergrond en informatie over de diepere ondergrond. Ondiepe vraagstukken hebben betrekking op de deklaagdikte, deklaag-doorlatendheid en de korrelgrootte van de top van de zandlaag. Mogelijke ruimtelijke patronen in de ondiepe bodemopbouw kunnen vaak ook via niet-geologische bureaustudies gevonden worden, bijvoorbeeld door afwijkingen in de hoogte, het landgebruik en/of het slotenpatroon te bekijken. Vaak betreft het bij informatie over de ondiepe ondergrond gegevens die, in geval van grondonderzoek, met handboringen goed in beeld kan worden gebracht.

Daarnaast speelt veelal een informatiebehoefte over de diepere ondergrond. Meestal heeft dit betrekking op de geohydrologische eigenschappen van het watervoerend pakket: dikte, doorlatendheid, bergings-eigenschappen/tijdsafhankelijkheid en

gelaagdheid/doorlatendheidsverschillen binnen het watervoerend pakket. Onderzoek naar deze parameters vereist vaak extra inspanning in zowel tijd als kosten. Onderzoek hiernaar wordt dan ook vaak pas bij gedetailleerd of maatwerk niveau uitgevoerd. In een eenvoudige analyse wordt voor dit onderzoek nog veel terug gevallen op archief- / of databasegegevens, zoals SOS, REGIS, en DINO/BRO.

Voorafgaande aan het grondonderzoek is het mogelijk dat het nogal onduidelijk is welke parameters er het meest toe doen. Oftewel, waar zet je je energie op zodat je er zoveel mogelijk uit kan halen met de minimale kosten. Indien men hier verduidelijkend over wilt, kan er een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd op verschillende parameters. Hier wordt in deze handreiking niet verder op ingegaan.



5. Ruimtelijke variatie van parameters

Een van de belangrijkste, en tevens lastigste, vraagstukken in de geotechniek zijn de afstanden waarover de parameters in de ondergrond variëren: de correlatielengte. Kennis hierover vormt echter wel de basis van een goed grondonderzoeksplan. In dit hoofdstuk wordt op basis van bevindingen uit pov Piping Verkenningen per parameter een beeld geschetst van de afstanden waarover deze kan variëren. Dit is gedaan om beoordelaars en ontwerpers te ondersteunen in de opzet van grondonderzoeksplannen.

De ruimtelijke variatie in de parameters die in hoofdstuk 2 zijn behandeld, is nader onderzocht binnen de pov Piping, veelal op basis van geostatistische analyses. Tabel 4 geeft het overzicht van typische correlatielengten die binnen de pov Piping zijn gevonden. Voor meer achtergrondinformatie over de ruimtelijke variatie en waar de waardes vandaan komen, wordt verwezen naar bijlage E.

De in tabel 4 genoemde correlatielengten zijn gebaseerd op geostatistische analyses. Deze hangen samen met de afmetingen van diverse geomorfologische eenheden, zoals (rest)geulen, kronkelwaarden en komgronden. De duidelijkste parameter die hiermee samenhangt is de deklaagdikte, maar ook korrelgrootten kunnen in restgeulen significant afwijken, zie hiervoor o.a. resultaten in [5].

In diverse onderzoeken binnen de pov Piping is de variatie van de deklaagdikte onderzocht. Uit [4] en [5] blijkt dat de ruimtelijke variatie ca. 15 à 30 m bedraagt. Dit is de waarde die in tabel 4 gegeven is. Daarnaast is bekend dat restgeulen en strangen vaak opgevuld zijn met klei en daarmee een lokale verdikking van de deklaag kunnen verklaren. Op basis van figuur

Parameter	Richting	Ruimtelijke variatie (correlatielengte)	Literatuur
Deklaagdikte	Horizontaal	Ca. 15 à 30 m ¹⁾	[4], [5]
Verticale doorlatendheid deklaag	Horizontaal	Ca. 15 à 30 m ²⁾	
	Verticaal	Ca. 0,2 à 0,5 m	[6]
Volumegewicht deklaag	Horizontaal	Ca. 15 à 30 m ²⁾	
	Verticaal	Ca. 0,2 à 0,5 m ³⁾	
Korrelverdeling van de zandlaag (D70)	Horizontaal	Ca. 3 à 40 m ⁴⁾	[7], [5], [8]
Doorlatendheid zandlaag (niveau: individuele zandlagen, zie bijlage E.7) ⁵⁾	Horizontaal	Ca. 20 m	[7], [9]
	Verticaal	Ca. 0,6 m	[7], [9]
Doorlatendheid zandlaag (niveau: geologische formaties, zie bijlage E.7) ⁵⁾	Horizontaal	Ca. 200 à 300 m	[9]

- Deze ruimtelijke variatie is afgeleid m.b.v. diverse onderzoeken binnen de pov Piping langs de Waal en de IJssel. In tabel 5 zijn daarnaast variaties van de deklaagdiktes gegeven in horizontale richting voor eenheden zoals wielen, strangen etc.
- Voor de variatie in korrelverdeling zijn in hoofdzaak dezelfde afzettingsprocessen verantwoordelijk die ook de variatie in deklaagdikte veroorzaken. Verwacht wordt daarom dat de horizontale ruimtelijke variatie van de deklaagdiktes ook bruikbaar zijn voor de horizontale ruimtelijke variatie van de samenstelling en daarmee doorlatendheid.
- De verticale variatie in samenstelling van de deklaag hangt samen met afzonderlijke lagen. Verwacht wordt dat dit globaal gelijk is aan de ruimtelijke variatie van de doorlatendheid in de verticale richting.
- De hier genoemde variaties hebben betrekking op een meso-schaal. Er is ook sprake van variatie op microschaal, maar binnen de pov Piping is dit (nog) niet onderzocht.
- Met formatieniveau wordt bedoeld dikkere zandpakketten of laagpakketten zoals wordt gehanteerd in de geologie. Het gaat hier om pakketten van meerdere meters dikte die (boven)regionaal te volgen zijn, zie bijv. [10]. Met individuele zandlagen wordt bedoeld op zandlagen die ruimtelijk over hooguit enkele tientallen meters voorkomen en een beperkte dikte (decimeterschaal) hebben.

Tabel 4 Ruimtelijke variatie in parameters (voor meer informatie wordt verwezen naar bijlage E)

4 uit [11] blijkt dat deze restgeulen een breedte van hebben van ca. 50 m. Uit [5] blijkt dat een daar aangetroffen opgevulde restgeul een breedte heeft van ca. 15 m. Uit een analyse van in het AHN zichtbare restgeulen verspreid over Nederland, blijkt dat opgevulde restgeulen en strangen overwegend een breedte hebben tussen de 10 en 50 m. Tabel 5 geeft een overzicht van de typische breedte van deze eenheden. Op een zelfde manier zoals hier beschreven voor de variatie in de deklaagdikte zijn de correlatielengtes van de overige parameters bepaald. Voor deze uitwerking wordt verwezen naar bijlage E.

Eenheid	Typische breedte ¹⁾
Wiel	50 – 100 m
Opgevulde restgeul / strang	10 – 50 m, lengte ca. 300 à >1000 m
Kronkelwaard / platen en slikken	Bovenrivierengebied: 50 à 150 m, lengte ruggen ca. 300 à 1000 m. Benedenrivieren / kust: 100 à 1000 m
Komgronden	> 100 m

- Gebaseerd op USACE (1956) en een analyse van in het AHN zichtbare eenheden bij Doesburg, Westervoort, Beneden-Leeuwen, Zaltbommel, Broekhuizen, Macharen, Amerongen, Werkendam, Sint-Annaland, IJsselmuiden, Bunschoten en Texel.

Tabel 5 Variaties deklaagdikte in horizontale richting



6. Voorbeelden omvang en afstanden grondonderzoek

In dit hoofdstuk worden twee principe voorbeelden van grondonderzoeksplannen geschetst voor een eenvoudige analyse en een meer gedetailleerde (gedetailleerd én maatwerk niveau) analyse. De afstanden en diepten zijn bepaald op basis van de in het vorige hoofdstuk behandelde, generieke, correlatielengten. Van de beoordelaar of ontwerper wordt verwacht dat de afstanden en diepten op de eigen situatie worden aangepast.

De grondonderzoeksplannen in dit hoofdstuk zijn slechts voorbeelden. Er wordt daarom van de beoordelaar of ontwerper verwacht dat de afstanden en diepten op de eigen situatie worden aangepast. Voor elk project moet er een afweging gemaakt worden over de hoeveelheid en soort onderzoek dat passend is bij het doel en de fase van het project.

Er wordt benadrukt dat bij de onderzoeksafstanden die in dit hoofdstuk genoemd worden er van uit is gegaan dat er geen enkele voorkennis is over de ruimtelijke variatie in een gebied. Wanneer deze voorkennis wel aanwezig is (archieffgegevens), wat meestal het geval is, kan de omvang van de grondonderzoeksinspanning veelal worden beperkt.

Er wordt een voorbeeld gegeven van een grondonderzoekplan voor een eenvoudige analyse waarbij een eenlaags pipingmodel wordt toegepast, en voor een gedetailleerde analyse, waarbij aanvullend een meerlaags pipingmodel (maatwerk) wordt toegepast. Deze grondonderzoeksplannen behandelen uitsluitend het deelmechanisme piping. Grondonderzoek heeft bij dit mechanisme vooral betrekking op de dijkteen en op het voorland, en is sterk gericht op de geohydrologie. Het onderzoek levert ook parameterwaarden op die nodig zijn voor de beoordeling van andere faalmechanismen, zoals macrostabiliteit.

6.1 Grondonderzoeksafstanden op projectbasis bepalen

De grondonderzoeksplannen worden gebaseerd op de verwachte variatie in de ondergrond en de afstanden waarover de variatie plaatsvindt. Hierbij wordt aangesloten bij de correlatielengten die in het vorige hoofdstuk zijn afgeleid op basis van de diverse verkenningen die plaats hebben gevonden binnen de POV Piping. De afgeleide generieke correlatielengten en variaties kunnen in heel Nederland¹ aangehouden worden, maar zijn niet noodzakelijkerwijs representatief voor alle projectlocaties. Uit eerder onderzoek kunnen bijvoorbeeld andere waardes bekend zijn of er blijkt een heel ander soort afzetting aanwezig.

In dat geval kan worden overwogen om de correlatielengte van een bepaalde parameter lokaal vast te stellen en hiermee een efficiënter onderzoeksplan op te stellen (i.p.v. de standaard waarden aanhouden, terwijl er bijvoorbeeld minder grondonderzoek nodig is met het aanhouden van de lokale correlatielengten). Er moet in het onderzoeksplan voldoende variatie in de meetafstanden zitten om de correlatielengte zowel bij korte als lange afstanden vast te kunnen stellen. Meetplannen waarin de afstanden tussen de punten variëren (bijvoorbeeld willekeurig inplannen, of geclusterd inplannen) voldoen hier beter aan dan plannen met alleen een raster-

structuur [9]. In figuur 2 is een voorbeeld van een plan weergegeven waarmee de correlatielengte op projectbasis bepaald kan worden. Dit is de minimale afstand die tussen de grondonderzoekspunten zou moeten worden aangehouden (h.o.h.). Doordat zowel op hele korte afstanden als op hele grote afstanden gemeten wordt, kan de correlatielengte voor verschillende schaalniveaus worden bepaald². De afstand tussen de locatiemetingen is elke keer een verdubbeling van de afstand tussen de twee eerdere metingen. Beginnend met een afstand van 2 m tussen de eerste twee metingen krijgt men 2, 4, 8, ... tot 256 of 512 m als bovengrens. Voorwaarde is hier wel dat in een pakket met dezelfde verwachte eigenschappen (afzettingsmilieu) wordt gemeten.



Figuur 2: Bovenaanzicht van een meetplan op één locatie waarmee de correlatielengte nauwkeurig kan worden bepaald voor bijvoorbeeld het voorland (cirkel) of een dijkteen (lijn).

¹ Nagenoeg alle verkenning vonden plaats in het rivierengebied, waardoor hier de meeste informatie beschikbaar voor was. Echter, uiteindelijk is er wel verder gekeken dan het rivierengebied, alleen met minder informatie / inzicht.

² In ORZW wordt 75 m voorgesteld voor de afstand tussen punten. Het is echter niet duidelijk op welke correlatielengte dit gebaseerd is.

6.2 Grondonderzoek voor een eenvoudige pipinganalyse

In deze paragraaf wordt een grondonderzoek beschreven voor een eenvoudige pipinganalyse. In een eenvoudige analyse wordt er veelal in hoge mate geleund op archiefgegevens als uitgangspunt. Op het moment dat er vervolgens veldmetingen worden uitgevoerd, is het belangrijk om deze resultaten te vergelijken met de archiefgegevens. Zo kunnen de parameters die met de archiefgegevens zijn vastgesteld, geverifieerd (of verworpen) worden.

6.2.1 Fase 1: Bureaustudie

Bij een bureaustudie is het zaak locaties met een afwijkende bodemopbouw in beeld te brengen. De eerste stap van het grondonderzoeksplan is dan ook het identificeren van geomorfologische eenheden, specifiek wielen, (rest)geulen/strangen, kronkelwaarden, komgebieden en/of gedempte sloten of plassen. Hoogteverschillen uit het AHN, historische kaarten, verschillen in begroeiing en/of landgebruik uit satellietbeelden, topkaarten en geo(morfo)logische kaarten (zie o.a. [12]) zijn zeer bruikbaar om deze macroschaal eenheden uit te karteren. Dit geldt met name voor de deklaagdikte, opbouw en korrelgrootte. Bij het beoordelen van specifieke situaties, zoals vestingwerken, moet een historisch specialist bij betrokken (zie bijvoorbeeld [4]).

6.2.2 Fase 2: Booronderzoek

Boringen ter verificatie van het archiefonderzoek zijn ook in een eenvoudige analyse wenselijk. De belangrijkste parameter waarvoor de variatie in detail in beeld moet zijn, is de deklaagdikte. De correlatielengte bedraagt hiervan ca. 15 à 30 m, of kan voor een bepaald gebied bepaald worden (zie bijlage E.2 en paragraaf 6.1). Voor een eenvoudige analyse is detailonderzoek op dit niveau niet reëel; zeker niet indien een gedetailleerde bureaustudie is uitgevoerd. De exacte locaties op het voor- en achterland worden daarom bepaald op basis van het archiefonderzoek, waarbij er naar gestreefd dient te worden in ieder onderscheidende eenheid ten minste 1 boring uit te voeren.

Indien het archiefonderzoek onvoldoende informatie heeft opgeleverd om een eenvoudige analyse uit te voeren, kan worden overwogen de boringen met een tus-senaafstand van ca. 500 m langs de binnentee-n en over de lengte van het voorland (L_v) uit te voeren. De boringen op het voorland kunnen hierbij afwisselend op ca. $\frac{1}{3} L_v$ en $\frac{2}{3} L_v$ vanaf de buitenteen uitgevoerd worden (zie figuur 3). L_v bedraagt in dit geval maximaal de onder-beheer zijnde (of komende) voorlandbreedte. Indien nodig kan er voor grondonderzoek ook buiten de beheerzone gekeken worden (per situatie beoordelen of het nodig is). Let hierbij wel op dat er (mogelijk) toestemming van externen benodigd is.

‘De belangrijkste parameter waarvoor de variatie in detail in beeld moet zijn, is de deklaagdikte.’

Monstername en laboratoriumonderzoek

Ten behoeve van parameterbepaling wordt aanbevolen van iedere laag (indicatief ca. 1/ meter) uit de boring een monster te nemen voor classificatie in het laboratorium. Van de handboringen langs de binnenteen wordt aanbevolen van iedere laagwisseling een ongeroerd monster te nemen voor bepaling van het volumegewicht. Ook kan worden overwogen enkele korrelverdelingen van de zandlaag ca. 20 cm onder de deklaag (indicatief ca. 1/ kilometer) te bepalen. Deze onderzoeken zijn uitsluitend bedoeld om de kentallen uit het

SOS (Stochastische Ondergrond Schematisatie) te verifiëren. Indien de kentallen compleet afwijken met de resultaten van het onderzoek, kunnen de kentallen uit het SOS niet gebruikt worden voor de eenvoudige analyse.

Doorlatendheidsonderzoek

Doorlatendheidsonderzoek van de deklaag en zandlaag is in een eenvoudige analyse niet gebruikelijk. Meestal wordt aangesloten op archiefgegevens, zoals de Grondwaterkaart/ REGIS en evt. SOS.



Figuur 3 Grondonderzoeksplan voor een eenvoudige analyse (niet op schaal)

Onderzoek	Hart-op-hart afstand	Afstand vanaf de binnenteen	Afstand vanaf de buitenteen	Monstername
Booronderzoek	500 m	Rond de teen uitvoeren	Afwisselend ca. $\frac{1}{3} L_v$ en $\frac{2}{3} L_v$	Van iedere laag 1 monster (indicatief ca. 1/meter) voor de deklaag

Tabel 6 Grondonderzoek voor een eenvoudige piping analyse

6.3 Grondonderzoek voor een gedetailleerdere piping analyse

In deze paragraaf wordt een grondonderzoek beschreven voor een gedetailleerdere pipinganalyse. Hierbij wordt opgemerkt dat een gedetailleerdere analyse vaak volgt op een eerdere eenvoudige analyse. In de praktijk zal daardoor veel informatie uit eerdere analyses (her)gebruikt kunnen worden om de onderzoeksinspanning te beperken en/of doelgericht in te zetten op één of enkele parameters. Het geschetste onderzoek in deze sectie zal daarom in veel gevallen niet in zijn volle breedte nodig zijn (bijv. als reeds bekend is dat er geen deklaag ligt, hoeft de doorlatendheid hiervan logischerwijs niet onderzocht te worden). Daarnaast wordt in dit hoofdstuk geofysisch onderzoek voorgesteld; hierbij wordt opgemerkt dat altijd eerst gekeken moet worden of met alleen bureaustudie reeds voldoende informatie beschikbaar is. Voor geofysisch onderzoek zijn altijd handboringen benodigd om de resultaten te interpreteren.

Bij dit gedetailleerde onderzoek wordt beoogd een onderzoek te schetsen waarbij alle parameters in dusdanige mate geïnventariseerd worden, dat voldoende inzicht in de spreiding van de parameterwaarden wordt verkregen. De pipinganalyse waar hier vanuit gegaan wordt, betreft een grondwaterstromingsanalyse op basis van een numeriek model op formatieschaal (meerlaags / gelaagd zandpakket). Op het moment van schrijven is een éénlaags analytisch model nog de gangbare methode. De huidige generatie numerieke modellen biedt echter de mogelijkheid om een meerlaagse pipinganalyse uit te voeren. Gezien de pipingopgave volgend uit éénlaagse modellen, wordt verwacht dat de meerlaagse methode in de toekomst veelvuldiger toegepast zal worden om tot een realistischer versterkingsopgave te komen.

In dit plan wordt ook een indruk gegeven van het aantal monsters dat voor laboratorium-

onderzoek ingezet zou kunnen worden. Het aantal monsters is echter niet exact te bepalen, simpelweg omdat dit onder meer afhangt van de in het onderzoek acceptabel geachte pmarge. Om toch een indicatie te geven is het aantal monsters bij een foutmarge van 5% gegeven. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de monsters uit 1 eenheid worden genomen (bijv. restgeul, kronkelwaard etc.). Het aantal monsters voor een 2% en 10% foutmarge is gegeven in bijlage E. Correlatielengten en variatiecoëfficiënten.

6.3.1 Fase 1: Bureaustudie

De inhoud van deze fase wijkt niet af van wat beschreven is onder 'Fase 1: Bureaustudie' van paragraaf 6.2.1.

6.3.2 Fase 2: Vlakdekkend geofysisch onderzoek

Helaas is het niet zo dat met een bureaustudie alle variatie in beeld kan worden gebracht. In de meeste gevallen zijn oorspronkelijke (hoogte)verschillen in de loop der tijd door groundbewerking, natuurlijke erosie of natuurlijke verlanding verdwenen. Dit kan zowel binnen- als buitendijks het geval zijn. De volgende stap is daarom om in het gebied, bijv. middels geofysisch onderzoek, laagovergangen in beeld te brengen. Diverse geofysische technieken kunnen rijdend en/of op het water worden uitgevoerd, waardoor het mogelijk is hiermee in korte tijd de variatie in met name deklaagdikten continue in beeld te brengen.

Aandachtspunt bij geofysische metingen

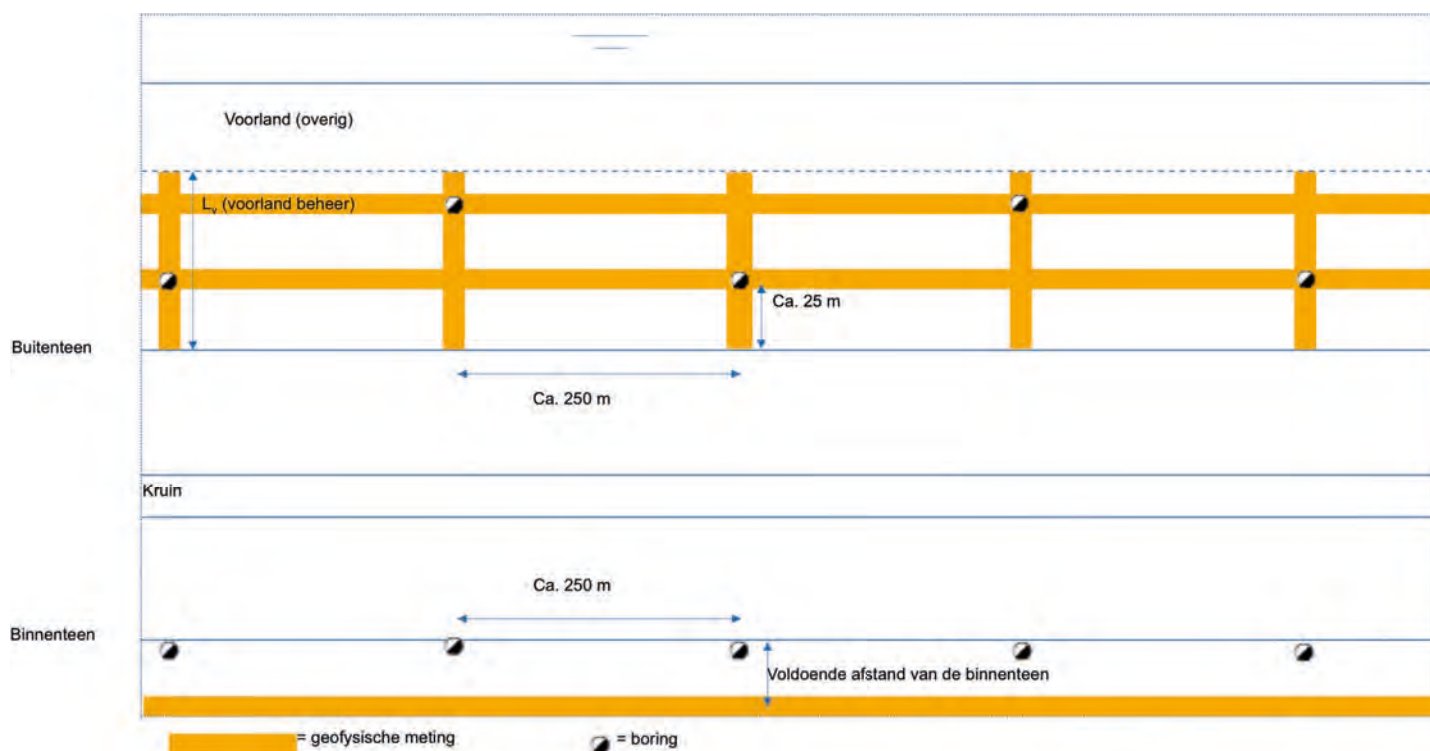
Er geldt specifiek voor gebieden met zout of brak grondwater (hogere geleidbaarheid) dat elektromagnetische metingen niet altijd succesvol zijn. Grondradar wordt in Nederland ook met enige regelmaat ingezet voor deklaagonderzoek, maar de ervaring is dat de resultaten hiermee eigenlijk alleen succesvol zijn bij dunne (<1 m) deklagen én droge omstandigheden. Grondradar en

elektromagnetische metingen laten zich goed combineren en kunnen snel en over grote strekkingen worden ingezet. In veel gevallen zal een combinatie van deze metingen, aangevuld met voldoende handboringen ter verificatie, daarom de voorkeur hebben.

Dichtheid geofysische metingen

Veel geofysische technieken meten in stroken met een breedte van enkele meters in de ondergrond. Om de deklaagdikte aan de binnenteen van de dijk te bepalen voldoet in de meeste gevallen één strook langs de teen. Hierbij moet worden opgelet dat de meting voldoende ver van de dijk zelf plaats vindt, zodat niet per abuis ook een deel van het dijklichaam zelf mee wordt gemeten waardoor mogelijk de meting wordt vertroebeld. Voor het voorland is het aan te bevelen ten minste de breedte van het voorland die onder beheer valt, te onderzoeken. Echter is het beter om het gehele voorland mee te nemen. De onderlinge afstand tussen de stroken wordt bepaald door de omvang van de geomorfologische eenheden die gevonden moeten worden. De raaien worden ingepland op basis van de vermoedelijke grenzen tussen geomorfologische eenheden die reeds gevonden zijn in de bureaustudie.

Bij geen of onvoldoende inzicht uit de bureaustudie dient van kentallen uitgegaan te worden. In tabel 5 zijn typische afmetingen van te onderzoeken eenheden weergegeven. Hieruit blijkt dat het veelal gaat om deklaagdiktevariaties binnen een voorland van gemiddeld 10 à 50 m breed en >300 m lang. Een patroon waarmee dergelijke variaties goed in beeld kunnen worden gebracht, zou kunnen bestaan uit meetraaien op 25 m onderlinge afstand parallel aan de dijk teen met ca. iedere 250 m een dwarsraai. De dwarsraaien verminderen de kans dat smalle langwerpige zandopduikingen tussen de langstraaien worden gemist.



Figuur 4 Geofysisch onderzoekspatroon (niet op schaal) met eventuele boringen (paragraaf 6.3.3)

Op basis van succesvol geofysisch onderzoek kunnen de grenzen van de geomorfologische eenheden definitief worden vastgesteld.

6.3.3 Fase 3: Booronderzoek

Nu alle eenheden in beeld gebracht zijn, breekt de fase aan om de daadwerkelijke parameters te verzamelen.

Indien geofysisch onderzoek beschikbaar is

Middels (hand)boringen en sonderingen kan de relatieve meetwaarde van de geofysische metingen worden omgezet naar een absolute waarde van de laagdikte. Tevens kunnen monsters worden genomen om de korrelverdeling van de zandlaag, het gewicht en de samenstelling van deklaag te bepalen.

Het geofysisch onderzoek kan worden gebruikt om dit onderzoek efficiënt in te plannen. Hierbij wordt in ieder geval aanbevolen om op alle locaties waar de deklaag het dunste en het dikste is een handboring uit te voeren op de raaien van het geofysisch onderzoek. Dit biedt de mogelijkheid om de geofysische meting om te zetten in een continue meting van de absolute deklaagdikte. Bij weinig zichtbare variatie in de resultaten van de geofysische metingen kan worden overwogen om in ieder geval iedere 250 m aan de teen van de dijk en ter plaatse van de geofysische langsraaien in het voorland een boring uit te voeren om de interpretatie van de geofysische metingen te ondersteunen en monsters te nemen. Hierbij moet er uiteraard wel rekening mee worden gehouden dat voldoende monsters beschikbaar komen (zie 'Monsternamen en laboratoriumonderzoek' op de volgende pagina).

Indien geen geofysisch onderzoek beschikbaar is

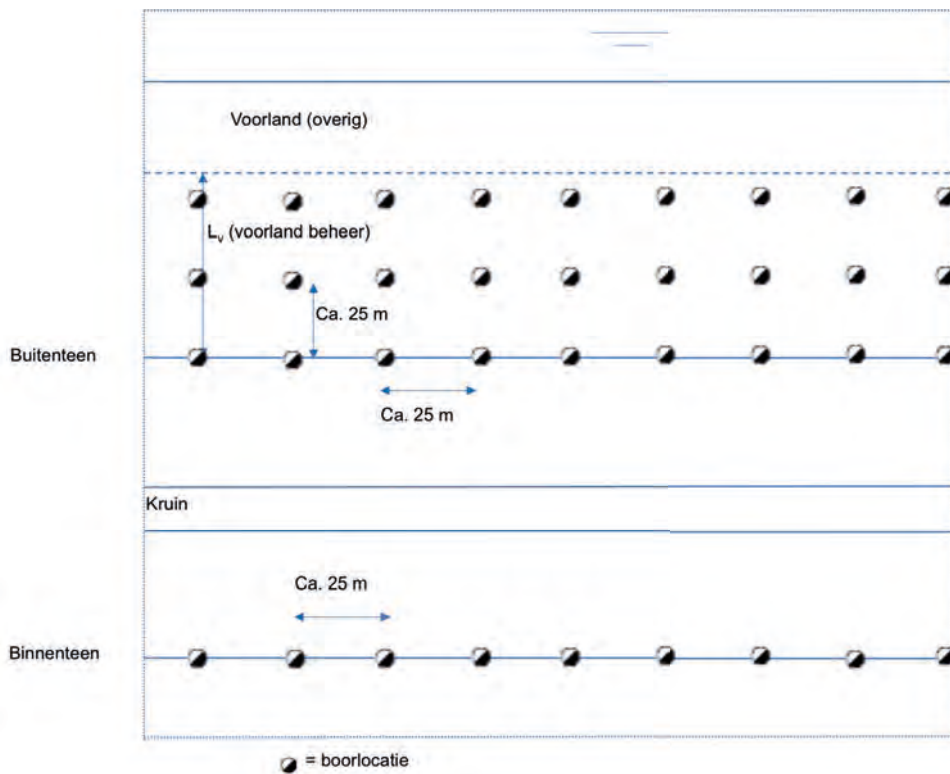
Regelmatig zal er geen geofysisch onderzoek beschikbaar zijn, want niet elke bodemopbouw leent zich er voor. Er zijn dan veel meer handboringen nodig. Om het grondonderzoek efficiënt in te kunnen plannen, is het belangrijk dat de variatie in deklaagdikte alsnog goed in beeld wordt gebracht. Dat betekent dat het grondonderzoek een dichtheid dient te hebben die gelijk of kleiner is dan de lokale correlatielengte. Het verdient in dat geval aanbeveling om langs de binnenteen om de 25 m een handboring uit te voeren. Daarnaast wordt aanbevolen in het voorland eveneens om de 25 m een handboring uit te voeren, maar dan niet dieper dan 2 m, om de intreede-weerstand te bepalen en alleen als de deklaag naar verwachting dunner is dan 3 m. Figuur 5 weergeeft een mogelijk boorplan in deze fase.

De genoemde afstanden zijn gebaseerd op de ruimtelijke variatie uit het voorgaande hoofdstuk. Per locatie kunnen deze echter verschillen. Om de onderzoeksinspanning te beperken kan ervoor gekozen worden eerst voor de lokale situatie inzicht te krijgen in correlatielengte van, met name, de deklaag (zie paragraaf 6.1).

Monsternamen en laboratoriumonderzoek

Voor de handboringen langs de binnenteen wordt aanbevolen van iedere laagwisseling een ongeroerd monster te nemen voor bepaling van het volumegewicht. Bij een foutmarge van 5% komt dit neer op ca. 5 monsters per grondlaag.

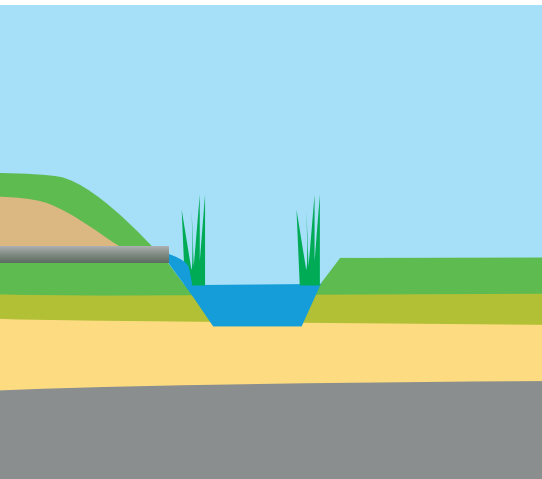
Langs de binnenteen, elke 250 m, worden monsters van het zand de eerste 20 cm direct onder de deklaag gebruikt om korrelverdelingen van te bepalen. Hierbij dient er aandacht aan besteed te worden dat de overgang van de deklaag naar de zandlaag vaak geleidelijk verloopt. Daarom kan worden overwogen geroerde monsters van iedere deel van de zandlaag te nemen en pas achteraf op basis van de schematisering van het vraagstuk te bepalen welke monsters voor een korrelverdeling (D70) worden ingezet. Het aantal benodigde monsters bij een foutmarge van 5% bedraagt ca. 20. Voor details t.a.v. korrelverdelingen wordt verwezen naar bijlage A3.



Parameter	Benodigde monsters	Foutmarge
Volumegewicht	5 ¹ per grondlaag, ongeroerd	5%
D70 (korrelverdeling)	20 ² voor de zandlaag, geroerd	5%

¹ Elke 25 m langs de binnenteen
² Elke 250 m langs de binnenteen, 0 tot en met 20 cm direct onder de deklaag

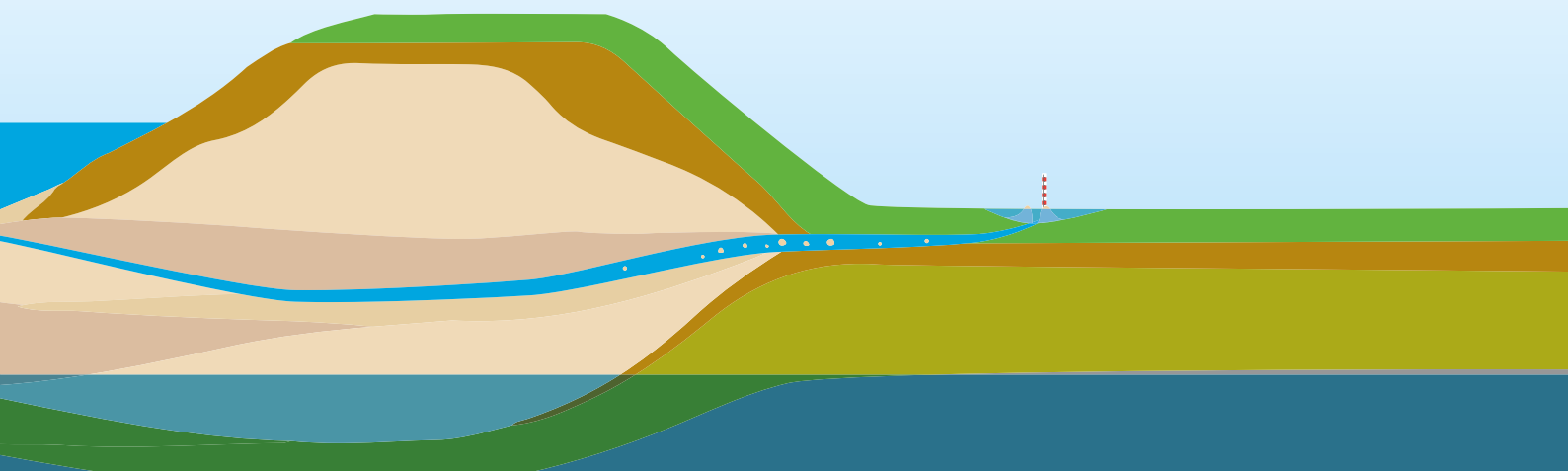
Figuur 5 Boorplan zonder geofysisch onderzoek beschikbaar inclusief benodigde monsters uitgaande van monsters uit 1 eenheid (bv. restgeul, kronkelwaard etc.)



Doorlatendheidsbepaling deklaag

Grote diameter infiltratieproeven

Uit onderzoek [6] blijkt dat de doorlatendheid van deklagen het beste gemeten kan worden met grootschalige doorlatendheidsmetingen of met meetnetten. Grootschalige metingen zijn >1 m diameter (bijlage G). De proeven kunnen per laag worden uitgevoerd of, indien de omstandigheden dit toelaten, voor de gehele deklaag. Er is geen onderzoek gevonden wat een duidelijk beeld geeft van de verwachte variaties in de doorlatendheid van de deklaag op lokale schaal, laat staan op schaal van verschillende geomorfologische eenheden. Het is dus aan de beoordelaar of ontwerper zelf om, eventueel in samenspraak met een ter zake kundig specialist, het benodigde aantal metingen te bepalen.



Meetnet

Een alternatief is lokaal meetnetten in te richten om het stijghoogteverloop onder de deklaag tijdens hoog water vast te stellen, en hier overall de weerstand van de deklagen uit af te leiden. Hiervoor wordt verwezen naar het factsheet Peilbuismeetnet (zie bijlage C2) en het synthesesedocument Monitoring.

Laboratoriumproeven

Het is mogelijk met handboringen ongeroerde monsters te nemen van deklagen, en op basis hiervan in het laboratorium de (veelal verticale) doorlatendheid te bepalen. Onderzoek [9] wijst echter uit dat de doorlatendheid in dat geval significant (factor 100) onderschat kan worden in verhouding tot de hiervoor beschreven grote schaalproeven. In geval van een voorland is dit mogelijk onveilig. Grote schaalproeven hebben daarom de voorkeur. Deze zijn echter kosten- en arbeidsintensief en zijn niet eenvoudig over grote afstanden te extrapoleren.

Uit [6] is echter af te leiden dat er wel degelijk een verband is tussen de verticale doorlatendheid uit laboratoriummonsters en de grote schaalproeven. Dit is ook weergegeven in bijlage E.7.6. Hieruit blijkt dat laboratoriumproeven dus ingezet zouden kunnen worden als eenvoudige methode om zonder veel kosten grootschalige proeven over grotere afstanden te extrapoleren.

6.3.4 Fase 4: Doorlatendheidsonderzoek zandpakket

Om een gedetailleerde pipinganalyse uit te voeren verdient het aanbeveling inzicht te hebben in de doorlatendheidsvariatie en dikte van de zandlaag. Deze informatie kan worden verkregen uit archiefgegevens, in welk geval het detailniveau van de analyse echter beperkt is tot een éénlaags analytisch pipingmodel.

Het éénlaags model was tot op het moment van schrijven de meest toegepaste methode. In [13], [14] en [15] is echter gevonden dat het op een gedetailleerder niveau (formatie-niveau) uitvoeren van een pipinganalyse een realistischer pipingontwerp op kan leveren. De nieuwe generatie numerieke modellen biedt hiertoe de mogelijkheid. Deze moeten echter gevoed worden met gedetailleerdere informatie. Hiervoor zijn een aantal opties beschikbaar: boringen met korrelverdelingen, HPT-(A)MPT sonderingen en glasvezel-technieken (zie bijlage B1 t/m B3). Pompproeven zijn meestal te grootschalig om de benodigde details in beeld te brengen, tenzij deze gecombineerd worden met boringen, zevingen en sonderingen.

Op basis van de gevonden horizontale en verticale ruimtelijke variatie dient rekening gehouden te worden met een onderzoeksafstand van ca. 200 tot 300 m voor rivierafzettingen. In de verticale wordt aanbevolen om in iedere zandlaag (> ca. 2 m) een meting uit te voeren om de variatie goed in beeld te krijgen.

Aangezien de horizontale correlatielengte globaal overeen komt met wat veelal maximaal aan voorland wordt meegerekend in een pipinganalyse, lijkt er vooralsnog geen reden om dit onderzoek separaat in het voor- en achterland uit te voeren; onderzoek ter plaatse van de dijk zal in de meeste gevallen volstaan.

Bij relatief dikke zandpakketten in verhouding tot de dijkzate (grondslag waarop een dijk rust, afstand van teen tot teen) zullen de diepere lagen weinig tot geen invloed hebben op de voeding van een mogelijk kanaal (pipe). De invloed van de dikte van het zandpakket is te beoordelen aan de hand van de pipinganalyse. Ge-laagdheid leidt er meestal toe dat het deel van een zandlaag dat nog een significant bijdrage levert aan de grondwaterstroom naar de pipe vaak minder wordt. Als praktische maat wordt een maximale diepte gelijk aan de dijkzate aangehouden tot ca. MV -30 m. Eventuele diepere lagen zijn te karakteriseren op basis van archiefgegevens; deze lagen hebben als gevolg van onvolkomenheid ook minder grote invloed op een eventuele pipe.



7. Literatuurlijst

- [1] E. Calle, U. Förster, G. van den Ham en G. Kruse, 'Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen,' Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012.
- [2] Rijkswaterstaat, 'Schematiseringshandleiding piping,' Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017.
- [3] NEN9997-1, Geotechnisch ontwerp van constructies Deel 1: Algemene regels, 2011.
- [4] De Groot, J.; Koopmans, R.; De Vries, K., 'pov Piping 'Proeftuin Mastenbroek' - Invloed van 'Dijk Geschiedenis', voorlanden en zandgrofheid op piping,' 2017.
- [5] Koopmans, R.; De Visser, M., 'pov Piping 'Pipingonderzoek dijkkring 43, d70 en Kd bepaling' onderzoek naar de toepasbaarheid van de rekenregel van Sellmeijer 2011 ondersteund met veldwaarnemingen,' 2016.
- [6] P. Aanen, 'Infiltratieproef in een uiterwaard,' Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, 1976.
- [7] T. Aigner en J. Heinz, 'Three-dimensional GPR analysis of various Quaternary gravel-bed braided river deposits (southwestern Germany),' *Ground Penetrating Radar in Sediments*, pp. 99-110, 2003.
- [8] M. Hijma en A. Wiersma, 'Korrelgroottes en heterogeniteit van rivierafzettingen in het licht van piping,' 2017.
- [9] M. Huber en M. van der Krogt, 'Analysis of permeability heterogeneity and its implications in piping assessment,' 2016.
- [10] H. Weerts, G. De Lange, J. Schokker en W. Westerhoff, 'De nieuwe lithostratigrafische indeling van afzettingen in de ondergrond van Nederland,' *Geotechniek*, Juli 2018.
- [11] USACE, 'Investigation of underseepage and its control - lower Mississippi river levees,' NTIS, 1956.
- [12] B. Berbee, G. van Goor en M. van der Meer, 'Werkwijzer Piping bij dijken,' Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Den Haag, 2014.
- [13] G. Van Goor en B. Berbee, 'ISAC|Piping: van complexe ondergrond naar pipinganalyse,' 2015.
- [14] R. Koopmans en W. Janssen, 'POP Piping - Invloed Maasklei en grindlagen,' 2017.
- [15] B. Berbee en G. van Goor, 'Zandlaagopbouw maakt realistisch dijkontwerp mogelijk,' *Land + water*, 2016.
- [16] Miramap, 'Productblad Dijkscan,' 28 7 2017. [Online]. Available: http://dijkscan.nl/userfiles/image/mir%20productblad%20dijkscan%20veenkaden%20web_klein.pdf.
- [17] M. de Kleine, A. Koelewijn en A. Venmans, 'Geo-impuls Pilot Julianakanaal,' Delft: Deltares, 2015.
- [18] B. Zuada Coelho, G. Diaferia, P. Kruiver en A. Venmans, 'Geofysische methoden - voor geotechnisch ingenieurs,' Delft: Deltares/Geoimpuls, 2015.
- [19] R. Koopmans en K. Helder, 'pov Piping - Intredeweerstand voorland Pannerdens kanaal,' 2017.
- [20] TAW, 'Technisch rapport klei voor dijken,' Delft, 1996.
- [21] Berbee, B.M.; Van Goor, G.R., 'Analyse vergelijking doorlatendheidsmetingen en HPT sonderingen,' 2015.
- [22] N. Bouwman, 'Piping en de heterogeniteit van zand,' 2016.
- [23] J. Nieuwenhuis, M. van der Meer, S. Bakkenist, Y. Pluijmers, R. Celemens en W. Zomer, 'LiveDijk XL Noorderzijlvest - State of the Art 2015,' Stichting Floodcontrol IJkdijk, 2016.
- [24] S. Bersan, A. Koelewijn en P. Simonini, 'Effectiveness of distributed temperature measurements for early detection of piping in river embankments,' *Hydrology and Earth Systems*, 2017.
- [25] S. Bakkenist, J. Rinsema en W. Zomer, 'Haalbaarheidsstudie Geofysische Karteringstechnieken,' 2018.

A Boringen



Naamgeving		1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau		Ontwikkefase	
Mech. boring (MB) Handboring (HB)		2D (vert.)	In-situ Lab	€ - €€*	Eenvoudig (HB) Gedetailleerd, maatwerk (HB+MB)		Handboring is standaard voor pipingonderzoek.	
	d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
	Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
HB	X	X	C	C	C			
MB	X	X	C	C	C	X	X	C
* mechanische boringen zijn significant duurder dan handboringen								
X	Voorkeursmethode				C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter				€ , €€ , €€€	Kosten goedkoop tot duur		

Omschrijving

In een boring wordt de grond daadwerkelijk omhoog gehaald. Handboringen zijn gebruikelijk voor de deklaag en top van de zandlaag en peilbuizen.

Mechanische boringen worden voor piping slechts incidenteel ingezet voor diepere monsternamen (korrelverdelingen of doorlatendheidsmetingen) en slugtesten (zie separate sheets). Er zijn verschillende uitvoeringsvarianten (edelman, guts, zuig, vibro, puls, avegaar, spoel, luchtlift, etc.). Het is van groot belang dat boorgaten na onderzoek goed afgedicht worden!



Handboring



Mechanische boring

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Handboringen dieper dan +/- 5 à 6 m kunnen arbotechnisch niet wenselijk zijn. Bemonster iedere laagwisseling om evt. achteraf nog te kunnen classificeren. Mechanische boringen alleen op goed bereikbare locaties plannen. Boringen in het voorland en achterland altijd afdichten.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Boringen in het voorland en achterland altijd afdichten. Let goed op kleur, grondwaterstanden en bijmengingsverschillen.
Uitwerking	

Voordelen

- HB goedkoop
- Monsternamen geroerd/ongeroerd
- Nauwkeurig zicht op materiaal
- Te combineren met slugtesten

Nadelen

- Puntmeting: interpolatie nodig
- Beperkte boordiepte HB

Lopende ontwikkelingen

A1. Slugtesten & boorgattechnieken

Naamgeving		1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase	
Hvorslev, Hooghoudt, Falling head, CCHP, Constant Flow, Sondeerslugtest, Aardvark, Boorgatstest, Slugtest		1D (punt)	In-situ lab	€-€€€*	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Doorontwikkelde techniek. Wordt incidenteel toegepast voor piping onderzoek.	
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X**	X**	C**	C**	C**	X***	X***	X
* kostenonderscheid hangt samen met het verschil tussen een goedkope handboring €, een iets duurere sondering €€ en een duurere mechanische boring €€€.							
/ indien gecombineerd met HB (***) of MB (***) boorteknik of sondeerteknik, wat meestal gebeurt.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Lever parameter			€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		

Omschrijving

Een slugtest wordt uitgevoerd in een boorgat, peilbuis of sondering. De slugtest levert een doorlatendheid van de onderzochte bodemlaag op. In de test wordt de waterstand verhoogd of verlaagd, waarna gemeten wordt hoe snel het waterniveau terug komt op zijn oude niveau. Hieruit wordt de horizontale doorlatendheid bepaald. Er zijn ook varianten met een constant(e) debiet/drukhoogte in omloop. Voor natuurlijke zandlagen levert deze techniek veelal een onderschatting van de formatie-doorlatendheid op waardoor de **toepasbaarheid voor piping beperkt** is. Het is van groot belang dat boorgaten na onderzoek goed afgedicht worden!



Uitvoering slugtest in MB gat



Uitvoering CCHP test

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> • Proeftype (constant/falling head) bepalen op basis van verwachte doorlatendheid. • Proef niet op laaggrenzen uitvoeren. • Proeven op peilbuisbasis: bij plaatsing vragen om aandacht voor afwerking filter.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> • Zorgen voor instantane wijziging waterniveau. • Na uitvoering dieper doorboren om bodemopbouw onder proefdiepte te verkennen.
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> • Let op randvoorwaarden rekenmethode (bodemopbouw en/of geometrie). • Bij peilbuizen gevoeligheidsanalyse uitvoeren op afwijkende boorgat geometrieën.

Voordelen

- Goedkoop i.c.m. handboring
- Snel uit te voeren
- Combineerbaar met handboringen.

Nadelen

- In natuurlijk zand onderschatting doorlatendheid
- Uitvoering in mechanische boring/sondering tijdrovend

Lopende ontwikkelingen

A2. Doorlatendheidsmeting (laboratorium)

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase		
Falling head Constant head	1D (punt)	In-situ Lab	€- €€€***	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Standaard techniek. Wordt zelden toegepast voor piping onderzoek.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X**	X**	C**	X	C**	X***	X***	X
* kostenonderscheid hangt samen met het verschil tussen een goedkope handboring €, een iets duurdere sondering €€ en een duurdere mechanische boring €€€.							
/*** indien gecombineerd met HB (***) of MB (***) boorteknik of sondeerteknik, wat meestal gebeurt.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		

Omschrijving

Een doorlatendheidsmeting in het laboratorium kan worden uitgevoerd op klei (falling head test) of op zand (constant head test). In een falling head test wordt een waterkolom op een monster gezet, en gemeten hoe snel het waterniveau daalt. In een constant head test wordt gemeten hoeveel water in een bepaald tijdsbestek door een monster stroomt. De meting kan uitgevoerd worden op een ongeroerd monster of, indien dit bijvoorbeeld los gepakt zand niet haalbaar is, een monster dat in het laboratorium verdicht is op de verwachte relatieve dichtheid in het veld. Hierbij gaat echter alle natuurlijke bodemstructuur verloren. Voor natuurlijke zand- en kleilagen leveren deze technieken veelal een onderschatting van de formatie-doorlatendheid op waardoor voor piping de vertaling naar een formatie-doorlatendheid aandacht verdient.



Permeameter apparaat

Aandachtspunten

Planfase	
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Naderhand monster altijd doorsnijden om te zien of stoorlagen de proef beïnvloeden Kijk of het mogelijk is het monsters horizontaal (t.o.v. in-situ) te beproeven
Uitwerking	Houdt rekening met verschil tussen formatie- en monsterdoorlatendheid

Voordelen

- Combineerbaar met handboringen

Nadelen

- In natuurlijk zand onderschatting doorlatendheid als gevolg van niet goed meenemen heterogeniteit.
- Zonder aanpassingen wordt overwegend verticale doorlatendheid bepaald.

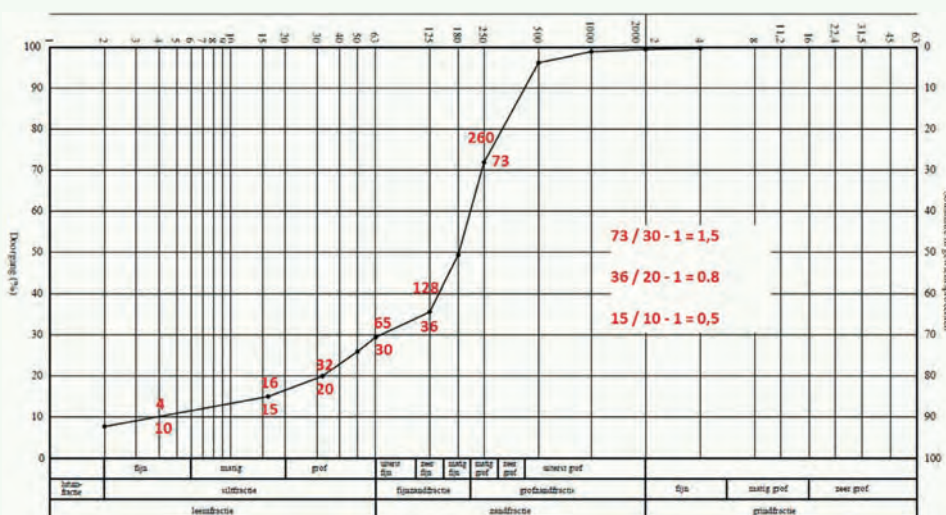
Lopende ontwikkelingen

A3. Korrelverdelingen (laboratorium)

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase		
Korrelverdelingen Zeving	1D (punt)	In-situ Lab	€- €€€*/**	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Standaard techniek. Wordt veelal toegepast voor piping onderzoek.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
				X			C
* kostenonderscheid hangt samen met het verschil tussen een goedkope handboring €, een iets duurdere sondering €€ en een duurdere mechanische boring €€€.							
/** indien gecombineerd met HB (***) of MB (***) boorteknik of sondeerteknik, wat meestal gebeurt.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Lever parameter			€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		

Omschrijving

Korrelverdelingen worden verkregen uit laboratoriumonderzoek. Voor de fracties >63 µm volstaat een zeving, voor de fracties <63 µm wordt veelal een aerometerproef uitgevoerd. Indien alleen de D70 bepaald moet worden, volstaat veelal alleen een zeving. Indien de doorlatendheid bepaald moet worden uit de korrelverdeling wordt vaak, en zeker bij matig of sterk siltige monsters, ook een aerometerproef uitgevoerd. Bij een zeving wordt het zand droog of nat door een zeef geschud of gespoeld. Bij een aerometerproef wordt gekeken naar de bezinksnelheid van fijne gronddelen in een waterkolom. Overwogen kan worden in het bereik van de verwachte D70 enkele extra zeven toe te voegen (zie bijlage E) om de D70 nauwkeuriger te bepalen, en grote extrapolatiefouten te vermijden.



Voorbeeld korrelverdeling

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Het is belangrijk dat monsters in hetzelfde type afzetting (en zelfde niveau) zijn gezet als de voor piping relevante zandbaan onder de dijk.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Indien sprake kan zijn van verkitting, bijvoorbeeld bij monsters met een hoog kalkgehalte (Limburg) kan worden overwogen een voorbehandeling uit te voeren om de kalk te verwijderen.
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> Het bepalen van doorlatendheden uit een korrelverdeling kan leiden tot een doorlatendheid die significant (factor 10x à 50x) afwijkt van de doorlatendheid uit veldproeven.

Voordelen

- Combineerbaar met handboringen.
- Goedkoop om uit te voeren.

Nadelen

- Puntmeting; je meet de D70 van slechts één locatie.
- Relatief grote monstergrootte waardoor ze mogelijk lagen bemonsteren die afgezet zijn onder andere omstandigheden en dus andere eigenschappen hebben.

Lopende ontwikkelingen



B Sonderingen



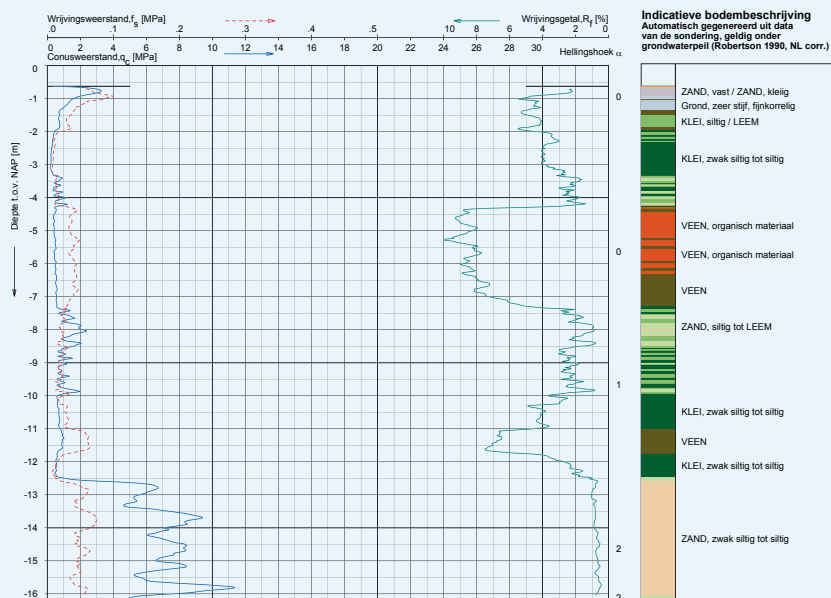
Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase		
CPT	2D (vert.)	In-situ Lab	€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	De standaard voor kartering van lagen dieper dan 5 m. Wordt redelijk vaak toegepast voor piping onderzoek.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X	C	C	C		X	X	
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		



Mini-sondeerrups

Omschrijving

Tijdens een sondering wordt met constante snelheid een sondeerconus met sensoren de bodem ingedrukt. Een 'standaard' conus omvat ten minste een sensor voor de helling, de weerstand en de wrijving. Aanvullende sensoren zijn mogelijk, waarbij waterspanning in de punt (U1) of op de schouder (U2) gangbaar zijn. U1 is geschikt voor het opsporen van dunne stoorlaagjes. De conus en wrijving kunnen worden gebruikt voor correlaties. Sonderingen worden meestal uitgevoerd met mechanisch materieel ter grote van een vrachtwagen (standaard sondeerwagen) tot kleine bestelbus (mini-equipment). Voor lastig terrein kan rupsmaterieel ingezet worden.



Voorbeeld sondergrafiek

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Letten op bereikbaarheid locaties. Classificatie toplagen vanuit sondering is lastig. Overweeg 1 à 2 m voor te boren.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Ruimte en bereikbaarheidseis.
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> Een waterspanningsmeting biedt inzicht in doorlatendheidsverschillen binnen zandlagen. Laagonderscheid op basis van conusweerstand is minder geschikt. Er zijn verschillende methoden om op basis van een waterspanningssondering tot een absolute doorlatendheid van zand te komen. Deze methoden zijn zeer gevoelig voor onnauwkeurigheid in aannames (bijv. hydrostatische druk).

Voordelen

- Gevoelig voor interpretatieverschillen. Goedkoper dan mechanische boring.
- Gevoelig voor interpretatieverschillen. Per 2 cm inzicht in deklaageigenschappen.
- U1 of U2 geeft beeld gelaagdheid zand.

Nadelen

- Geeft geen directe absolute waarden doorlatendheid of korrelgrootte. Dit moet afgeleid worden met andere methoden.
- Gevoelig voor interpretatieverschillen.

Lopende ontwikkelingen

B1. HPT sondering en (A)MPT (anisotrope) Mini-pompproef

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkelfase
HPT, MPT, AMPT	2D (vert.)	In-situ Lab	€€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Opkomende techniek voor doorlatendheidsonderzoek. Voor piping reeds regelmatig toegepast.

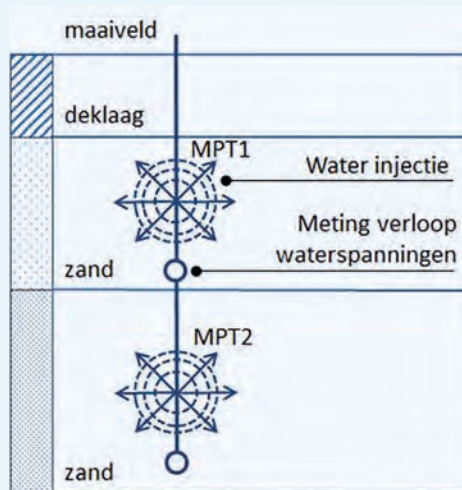
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X	C*	C*	C*		X	X	X

* indien gecombineerd met traditionele sondeerconus, wat meestal gebeurt.

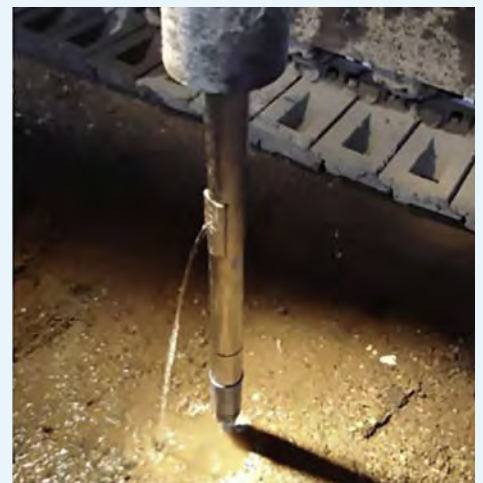
X	Voorkeursmethode	C	Parameter via correlatie
X	Levert parameter	€,,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur

Omschrijving

Tijdens HPT sonderingen wordt met een constant debiet water in de bodem geïnjecteerd. De benodigde waterdruk in de bodem wordt gemeten waaruit een relatieve doorlatendheid wordt berekend. Tijdens een (A)MPT wordt de HPT sondering stil gezet en wordt water in de bodem gepompt. De ontwikkeling van de waterdruk wordt op enige afstand van het injectiepunt gemeten waaruit de absolute doorlatendheid en bergingscoëfficiënt berekend wordt. In combinatie met de HPT sondering wordt een continu profiel van de horizontale en evt. verticale doorlatendheid afgeleid.



Schematische weergave MPT



HPT sondering in uitvoering

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> • Debiet afstemmen op verwachte doorlatendheid en korrelspanningen. • MPT testen niet op laaggrenzen uitvoeren.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> • Controleren op verstopping na MPT. • Zorgen voor voldoende water / tappunt.
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> • Controleren of verspoeling is opgetreden. • Corrigeer voor sensorafstand (HPT-AMPT)

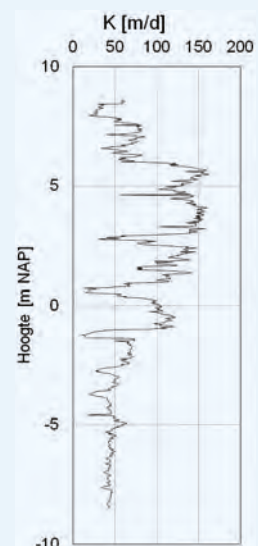
Voordelen

- Goedkoper dan pompproef.
- Iedere 2 cm inzicht in doorlatendheid.
- I.c.m. traditioneel sondeeronderzoek.

Nadelen

- Past niet op ieder sondeersysteem.
- Toepassing boven grondwaterstand onbekend.

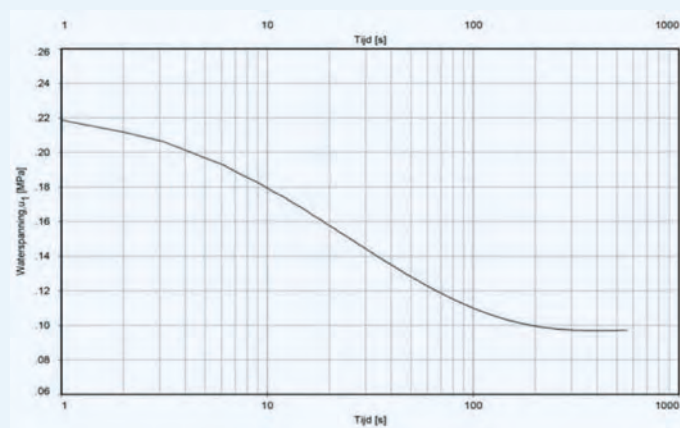
Lopende ontwikkelingen



Resultaat HPT sondering

B2. Dissipatietest

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkelfase		
	1D (vert.)	In-situ Lab	€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Standaard techniek. Wordt minimaal toegepast voor piping onderzoek.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}, k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X*	C*	C*	X		X*	X*	X
* indien gecombineerd met traditionele sondeerconus, wat meestal gebeurt.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		



Sondeerrups (links) en Meetresultaat dissipatietest (rechts)

Omschrijving

Tijdens het uitvoeren van een waterspanningssondering wordt waterdruk opgebouwd rond de conuspunt. Om deze test uit te voeren moet aan de conus een waterspanningsmeter geplaatst worden die de waterspanning in de ondergrond meet. Door een pauze tijdens het sonderen in te lassen, wordt de afname van de waterspanning gemeten. De duur hiervan is een maat voor de doorlatendheid. Qua uitwerking zijn er zowel fysische als empirisch uitwerkingsmethoden in omloop. Voor natuurlijke zandlagen leveren fysische methoden veelal een onderschatting van de formatie-doorlatendheid op waardoor de toepasbaarheid voor piping beperkt is. Empirische methoden leveren overwegend een beter resultaat op voor piping vraagstukken, maar max. toepasbaar tot 10 m/d met een nauwkeurigheid van +/- 50%, waardoor de toepasbaarheid voor piping beperkt is.

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Per verwachte formatie/laag enkele testen inplannen. Vooraf bedenken welke uitwerkingsmethodiek gehanteerd wordt, en type waterspanningsconus (U1 of U2) hierop afstemmen.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Test niet op laaggrenzen uitvoeren. Test doorzetten tot geen wijziging meer wordt waargenomen.
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> Controle of test voldoende is uitgedissepeerd (geen drukwijziging in laatste minuten).

Voordelen

- Goedkoop.
- Snelle uitvoering.

Nadelen

- Fysische methoden onderschatten in natuurlijk zand doorlatendheid.
- Empirische methoden zijn beter maar in de praktijk toepasbaar tot ca. 10 m/d.
- Zeer lokale test: veel proeven vereist om goed beeld van variatie te krijgen.

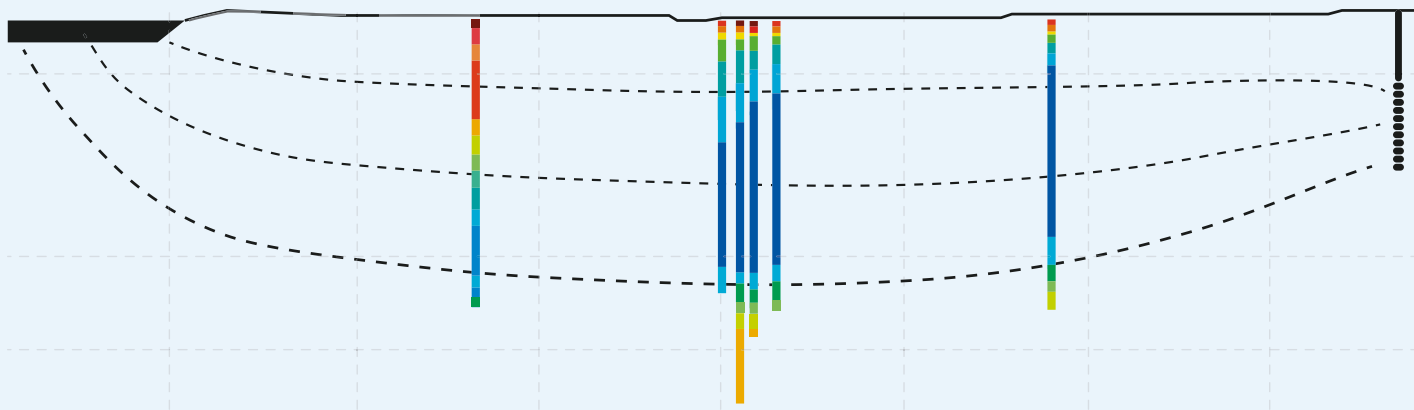
Lopende ontwikkelingen

B3. Verticale glasvezel T-meting

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkelfase		
	2D (vert.)	In-situ Lab	-	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Nieuwe techniek voor doorlatendheidsonderzoek. Voor piping nog niet toegepast.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X	Voorkeursmethode				C	X	X
X	Levert parameter				€,,€€,€€€	Parameter via correlatie Kosten goedkoop tot duur	

Omschrijving

Met de sondeertechniek kunnen glasvezelkabels verticaal de bodem ingebracht worden. Door deze op korte afstand van elkaar aan te brengen en gedurende enige dagen één van de kabels op te warmen, kan de lokale stroomsnelheid en evt. richting van het grondwater worden bepaald. Indien er uit (bijv.) peilbuismetingen het hydraulisch potentiaal bekend is, en er is ook een porositeit bekend, kan in principe de doorlatendheid van de bodem worden afgeleid. Het is niet bekend of dit in Nederland ooit is gedaan. De techniek is met succes toegepast in de nabijheid van een drinkwaterwinning. Er is nog geen ervaring beschikbaar over benodigde opwarmtijden bij geringere verhangen, zoals bijvoorbeeld bij gemiddelde omstandigheden onder een rivierdijk.



Principe van glasvezelmetingen

Aandachtspunten

Planfase	• Afstand tussen kabels afstemmen op verwachte stroomsnelheid grondwater.
Uitvoering	
Uitwerking	

Voordelen

- Inzicht in lagen met verschillende doorlatendheid.

Nadelen

- Toepassing boven grondwaterstand niet mogelijk.
- Voor afleiding doorlatendheid aannamen noodzakelijk.
- Langdurige meting i.v.m. opwarmtijd.

Lopende ontwikkelingen



c Geohydrologisch



CI. Infiltrometerproeven

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase		
Grote diameter infiltratietest Infiltratieproef XL	1D (punt)	In-situ tab	€€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Wordt incidenteel toegepast voor voorlandonderzoek		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X			X				
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		

Omschrijving

Voor een infiltratieproef wordt een infiltratiering of -bak op enige diepte onder maaiveld op de bodem neergezet. Door water toe te voegen aan de bak en te meten hoe snel dit wegloopt kan de doorlatendheid van de kleilaag bepaald worden.



Dubbele infiltrometerproef



Opbouw dubbel infiltrometerproef

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Vooraf bepalen welke lagen aanwezig zijn. Iedere laag beproeven. Bovenste 0,5 à 1,0 m kunnen afwijken in de doorlatendheid; hier niet meten voor voorlandonderzoek. Voor voorland geen kleine diameter proeven: ca. >1 m i.v.m. bodemheterogeniteit.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Zorgen voor goede afdichting langs de randen. Instrument zoveel mogelijk rechtstandig en zonder wrikken aanbrengen. Bodem voldoende nat maken voor de meting (voornatten): infiltratiesnelheid moet nagenoeg constant zijn. Bodemopbouw en lokale grondwaterstand achteraf bepalen. Uitvoeren na periode van langdurig neerslagoverschot om vergelijking met hoogwaterperiode mogelijk te maken.
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> Controle voornatting: berekende doorlatendheid mag niet wijzigen in de tijd. Rekening houden met lokaal grondwatervniveau.

Voordelen

- Onafhankelijk optreden hoog water.
- Indien verschillende lagen bemonsterd mogelijkheid tot proevenverzameling.

Nadelen

- Tijdrovende meettechniek vanwege voornatten.

Lopende ontwikkelingen

c2. Peilbuismetnet

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase		
	3D (punt)	In-situ tab	€€€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Standaard techniek, wordt voor piping onderzoek incidenteel toegepast.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X*	X*	C*	X	C*			X
* indien gecombineerd met handboring, wat meestal gebeurt.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		

Omschrijving

Een peilbuismetnet bestaat veelal uit enkele peilbuizen in het voor- en achterland, waarin de respons van de stijghoogte op een wijziging in de buitenwaterstand wordt gemeten. Voor toepassing bij piping kan uit de respons de doorlatendheid van de zandlaag en de bergingscoëfficiënt (tijdsafhankelijkheid) worden afgeleid. Indien het voorland ook onder water staat, kan daarnaast ook de weerstand / verticale doorlatend van de deklaag in voorland worden afgeleid. De afleiding van parameters uit een peilbuismetnet vereist geohydrologische kennis. Bij toepassing dient rekening te worden gehouden met langdurige instandhouding en onderhoud (bereikbaarheid, evt. zandvang, niet vollopen tijdens hoog water). Bij interpretatie dient daarnaast rekening gehouden te worden met het ontlastende effect van evt. opbarstprocessen in het achterland. Ook dient rekening te worden gehouden met evt. 3D effecten.



Peilbuisput met telemetrisch systeem

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> • Modelleer het verwachte stijghoogteverloop en bepaal op basis daarvan peilbuislocaties. • Is er voldoende kans op overstrooming voorland? Houd rekening met zomerkade. • Plaats minimaal 2 peilbuizen in het voorland en bepaal noodzaak zandvang. • Houd rekening met afwerkhoogte i.v.m. hoog water en bereik/onderhoudbaarheid. • Telemetrisch meetsysteem toepassen of regelmatig onderhoud/controlé inplannen. • Plaats een peilbuis op diepte als er geen info in Regis beschikbaar is.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> • Zorg voor goede filterafwerking en afdichting. • Zorg voor terugvindbaarheid (markeer).
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> • Houd rekening met 3D effecten (plassen, hoge grond), evt. onderlopen voorland.

Voordelen

- Enige nauwkeurige meting van voorlandweerstand.

Nadelen

- Deskundige nodig voor ontwerp en interpretatie.
- Dure methode, succes sterk afhankelijk van buitenwaterstand (vereist tijd/geduld).
- Resultaat beperkt extrapolieerbaar.

Lopende ontwikkelingen

c3. Pompproef

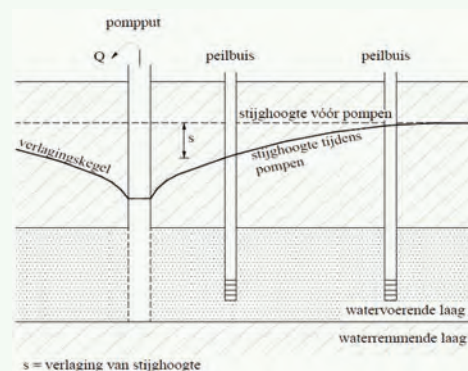
Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase		
	3D (punt)	In-situ tab	€€€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Standaard techniek, wordt voor piping onderzoek incidenteel toegepast.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X*	X*	C*	X	C*			X
* indien gecombineerd met handboring, wat meestal gebeurt.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		

Omschrijving

Een pompproef lijkt op een peilbuismeetnet met het verschil dat in plaats van gebruik te maken van een fluctuatie in de buitenwaterstand, deze te creëren is met een pomp. Een pompproef bestaat veelal uit een onttrekkingsfilter met pomp in het midden omringd door peilbuizen. Door de waterstanden te meten bij een bepaald debiet kan de doorlatendheid van de zandlaag en de bergingscoëfficiënt (tijdsafhankelijkheid) worden afgeleid. Indien de (grond)waterstand in of boven de deklaag gelegen is, kan ook de weerstand /doorlatendheid van de deklaag worden bepaald. Veelal levert een pompproef één doorlatendheid op voor het gehele watervoerend pakket. Bij een goed ontwerp kan in incidentele gevallen voor verschillende zandlagen de doorlatendheid wordt bepaald. De afleiding van parameters uit een pompproef vereist geohydrologische kennis. Bij interpretatie dient rekening gehouden te worden met evt. 3D effecten.

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Ontwerp een pompproef op de verwachte geohydrologische eigenschappen. Plaats peilfilters in verschillende zandlagen en in de deklaag. Houd rekening met verlagings tijdens de proef: voorkom dat peilbuizen droog vallen.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Zorg voor goede filterafwerking en afdichting, ook bij stoorlaagjes in zandlagen.
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> Houd rekening met 3D effecten (plassen, hoge grond), evt. onderlopen voorland.



Principe van pompproef

Voordelen

- Alternatief voor voorlandonderzoek indien grondwaterstand in of boven de deklaag en geen onderlopen voorland wordt verwacht.

Nadelen

- Deskundige nodig voor ontwerp en interpretatie.
- Dure methode.
- Resultaat beperkt extrapolieerbaar.

Lopende ontwikkelingen



Proef in opbouw

D Geofysisch

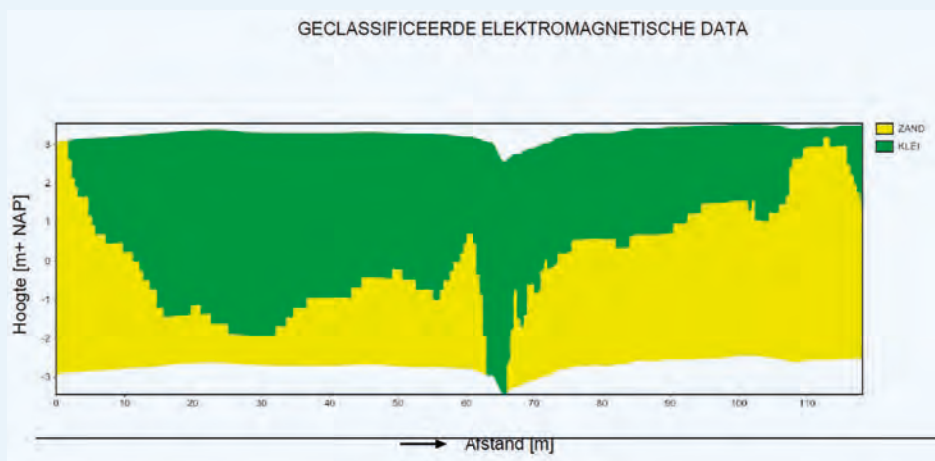


D1. Elektromagnetische meting

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase		
EM	2D (hor.)	In-situ 	€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Doorontwikkelde techniek. Wordt met regelmaat toegepast voor piping onderzoek.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}, k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X^*	X^*						
* lokale correlatie met boring vereist.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		

Omschrijving

Bij een elektromagnetische meting wordt het elektrisch geleidingsvermogen van de bodem gemeten met behulp van zend- en ontvangstspolen. Het elektrisch geleidingsvermogen van de bodem hangt samen met onder meer de korrelgrootte (klei vs. zand), maar ook met verschillen in grondwatersamenstelling. Uitvoering vindt overwegend lopend en rijdend plaats. Er zijn voor vrijwel alle mogelijke meetdiepten (tot ca. 7 m) systemen op de markt. Om van de metingen naar een deklaagdikte en/of opbouw te gaan, wordt het geleidingsvermogen gecorreleerd met boringen.



Resultaat geïnterpreteerde EM meting met restgeul



Lopende EM meting

Aandachtspunten		Voordelen	Nadelen
Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Plan geen metingen nabij leidingtracés (incl. lantaarnpalen) of hekken. Houd rekening met de bereikbaarheid. Stem het dieptebereik van de meetapparatuur af op de verwachte deklaagdikte. 	<ul style="list-style-type: none"> Goedkoop bij lange-re strekkingen. Toe te passen op land en water. Te combineren met bijv. grondradar. 	<ul style="list-style-type: none"> Altijd nog boringen nodig. Gevoelig voor afwijkingen in grondwater/leidingen/hekwerken.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Bij onverwachte afwijkingen direct een extra meetraai lopen. Ver van geleidende elementen (hekken, leidingen, etc.) verwijderd blijven. 		
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> 2D en 3D model ondergrond. Correlatie a.d.h.v. selectie boorgegevens, overige boringen als controle groep. 		

Lopende ontwikkelingen

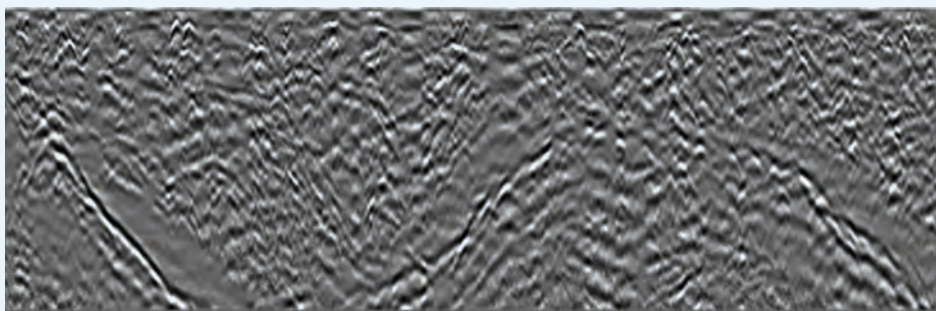
- Toepassing vanuit lucht of varend wordt door verschillende partijen verkend. Grootschalige toepassing binnen waterkeringen vindt door wettelijke beperkingen vanuit de lucht nog weinig tot niet plaats.

D2. Grondradar

Naamgeving		1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase	
GPR		2D (hor.)	In-situ tab	€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Doorontwikkelde techniek. Wordt incidenteel toegepast voor piping onderzoek.	
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X*						X	
* lokale correlatie met boring vereist.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€.,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		



Grondradar achter een quad, klaar voor gebruik



Resultaat GPR data van geulstelsel

Omschrijving

De grondradar werkt met elektromagnetische golven die met een radarantenne (zendantenne) de grond ingestuurd worden. De golven kunnen door laagscheidingen of objecten worden weerkaatst en door de (ontvangst)antenne opgevangen. Deze zijn zo bruikbaar om de dikte van de afdeklaag te bepalen (= laagscheiding) tot ca. 0,5 à 1,5 m diepte. Om van de metingen naar een deklaagdikte en/of opbouw te gaan, wordt het radargram gecorreleerd aan boringen. Grondradar geeft slecht resultaat onder het (grond) water of in een zoute omgeving. Ook natte klei kan het resultaat negatief beïnvloeden. De grondradar wordt beperkt toegepast voor piping.

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Stem het nut van GPR af op verwachte grondwaterstand en dikte kleilaag. Houd rekening met de bereikbaarheid/begaanbaarheid (bijv. hoog gras).
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Met verschillende frequenties werken om zowel details als penetratie te maximaliseren.
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> 2D en 3D model ondergrond. Correlatie a.d.h.v. boorgegevens.

Voordelen

- Goedkoop bij langere strekkingen.
- Te combineren met bijv. EM.

Nadelen

- Altijd nog boringen nodig voor interpretatie.
- Slecht toepasbaar onder grondwaterstand.
- Slecht toepasbaar in klei/veen pakketten > 0,5 / 1 m.
- Slecht toepasbaar in zoute omstandigheden

Lopende ontwikkelingen

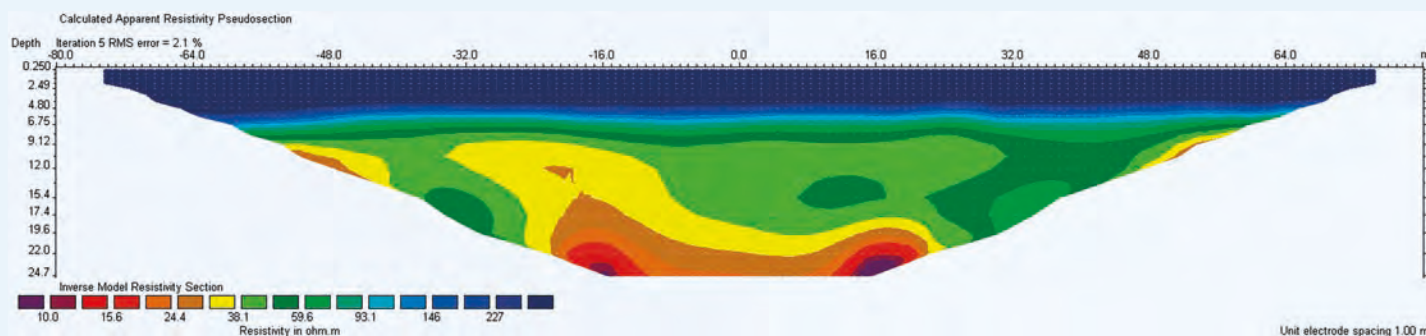
- Multi-frequentie GPR.

D3. Elektrische weerstandsmeting

Naamgeving		1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase		
VES en ERT		2D (hor.)	In-situ 	€€€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Doorontwikkelde techniek. Wordt zelden toegepast voor piping onderzoek.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$	
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)	
X*	X*				X*	X*		
* lokale correlatie met boring of sondering vereist.								
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie			
X	Levert parameter			€€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur			

Omschrijving

Bij een ERT meting wordt er stroom in de ondergrond gebracht met behulp van een accu en enkele stroomelektrodes. Vervolgens wordt over enkele potentiaalelektrodes het potentiaalverschil gemeten, waaruit de elektrische weerstand van de ondergrond bepaald kan worden. Deze weerstand is afhankelijk van het type grond, waardoor verschillende lagen onderscheiden kunnen worden. De nauwkeurigheid neemt af met de diepte (dieptebereik tot ca. 20 m), waardoor de methode enkel geschikt is voor het bepalen van de onderkant van de deklaag. Daarnaast is de resolutie van het dieptebereik 10-25 % van de elektrodeafstand. Uitvoering is op zowel land als water mogelijk. Om van de metingen naar een deklaagdikte en/of zandlaagopbouw te gaan, wordt de weerstand gecorreleerd met boringen.



ERT resultaat

Aandachtspunten		Voordelen	Nadelen
Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Goed bepalen welke meetdiepten voor het vraagstuk gewenst zijn. 	<ul style="list-style-type: none"> Redelijk gedetailleerd profiel met gelaagdheid. 	<ul style="list-style-type: none"> Tijdrovende en dure methode. Vraagt een goed contact met de grond.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Elektrode afstand afstemmen op details en diepte. 		
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> Correlatie m.b.v. boor- en sondeergegevens. 		

Lopende ontwikkelingen

- Sleep elektroden voor snelle, ondiepe (tot ca. mv – 1,5 m) data acquisitie.

D4. Lekdetectie (SP, AL, DTS)

Naamgeving		1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase	
SP Self potential meting AL Akoestische lekdetectie DTS Glasvezel voor meting temperatuur		2D (hor.)	In-situ tab	€€€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Opkomende technieken, incidenteel toegepast voor piping onderzoek.	
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
Lekdetectietechniek, levert geen parameters.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		

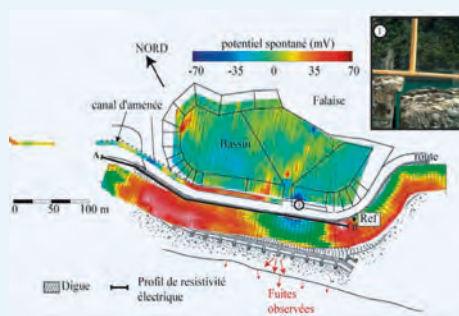
Omschrijving

SP techniek maakt gebruik van sensoren die de elektrische ladingen in de bodem, veroorzaakt door snelheidsverschillen in grondwaterstroming, detecteren.

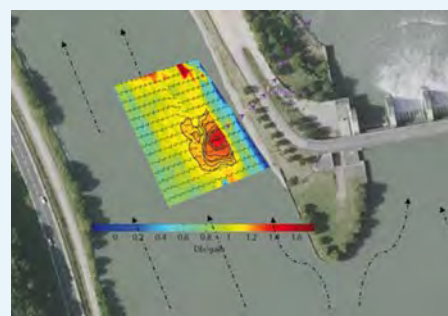
AL gebruikt een gevoelige onderwater microfoon om het akoestische signaal van een lekkage in het water te detecteren.

DTS meet de temperatuur van uittredend water door het aanbrengen van glasvezel in een dijk op de gewenste monitoringsdiepte. Dit gebeurt ofwel in een sloot of in een gleuf in de zandlaag net onder de deklaag.

Nadeel van deze lekdetectietechnieken is dat geen parameterwaarde wordt verkregen, maar met name kwalitatieve gegevens over grondwaterstromingsverschillen. Indien een zwakke plek wordt gevonden, hoeft dat dus niet te betekenen dat andere plaatsen bij hoog water niet ook als zwakke plek gelden. De technieken kunnen dus vooral helpen om grondonderzoek gericht uit te kunnen voeren.



Resultaat SP lekdetectie



Resultaat akoestische lekdetectie

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Locaties opzoeken waar weleens kwel wordt geconstateerd of die mogelijk opbarsten.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Beste resultaten worden verkregen in geval van hoogwater (relevante grondwaterstroming).
Uitwerking	

Voordelen

- Biedt inzicht in mogelijke zwakke plekken.
- Mogelijk kwelplek vroeg in het proces detecteren.

Nadelen

- Levert geen ontwerp- of beoordelingsparameter.
- Geen diepte gegevens van lek.
- Tijdrovende methode (SP, AL).
- Mogelijke kwellocaties moeten al deels bekend zijn.

Lopende ontwikkelingen

- Aanbrengen van vaste sensoren in dijken die lekkages bijtijds ontdekken.

D5. Lekdetectie (TIR, radiometrie)

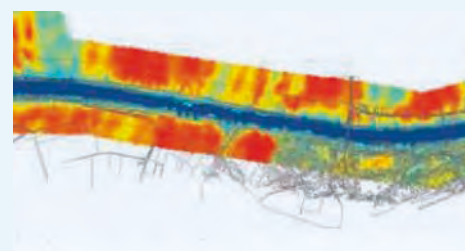
Naamgeving		1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkefase		
TIR Thermisch infrarood Passieve microgolf radiometrie		2D (hor.)	In-situ 	€*/**	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Doorontwikkelde techniek. Incidenteel toegepast voor piping onderzoek		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$	
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)	
Lekdetectietechniek, levert geen parameters.								
* Kosten zijn sterk afhankelijk van het type infraroodsensor (hogere kwaliteit betekent duurdere sensor).								
** Uitgegaan van de toepassing auto als platform berijdbare kering.								
X	Voorkeursmethode				C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter				€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		

Omschrijving

IR techniek berust op temperatuurverschillen, welke gemeten worden met een infrarood sensor. Deze sensor wordt aan een platform (auto, quad, drone etc.) bevestigd, waarna er per locatie stilstaande beelden gemaakt worden van de zichtbare omgeving. Bij kwellocaties komt grondwater aan maaiveld wat in temperatuur verschilt van oppervlaktewater. De infrarood sensor neemt dit verschil waar waardoor de kwellocatie in beeld gebracht kan worden.

De passieve microgolf radiometrie meet de natuurlijke radiostraling die uitgezonden wordt van de aarde vanaf de platformen quad, vliegtuig of satelliet. De bijbehorende frequentie is afhankelijk van een combinatie van de grondsoort en vochtigheid. Met deze techniek wordt de dielektrische constante gemeten welke terug vertaald wordt naar een grondsoort en vochtigheid.

Nadeel van deze technieken is dat geen parameterwaarde wordt verkregen. Wel kan een schatting van het uittredepunt verkregen worden. Echter, indien een zwakke plek wordt gevonden, hoeft dat niet te betekenen dat andere plaatsen bij hoog water niet ook als zwakke plek gelden.



Resultaat passieve microgolf radiometrie, waarin de rode plekken vernatting laten zien [16]

Aandachtspunten	
Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Meting inplannen wanneer de waterstand hoog genoeg is voor het ontstaan van kwelstromen of opbarsten van de deklaag.
Uitvoering	<ul style="list-style-type: none"> Visuele inspectie uitvoeren om resultaten te verifiëren. Nulmeting onder droge omstandigheden is gewenst om kwelplekken door hoogwater te detecteren.
Uitwerking	

Voordelen	Nadelen
<ul style="list-style-type: none"> Biedt inzicht in mogelijke zwakke plekken. Grote afstand inspecteren op een dag op begaanbare wegen. 	<ul style="list-style-type: none"> Levert geen ontwerp- of beoordelingsparameter. Slechte resultaten indien er kleine verschillen worden gemeten tussen het kwelwater en de omgeving.

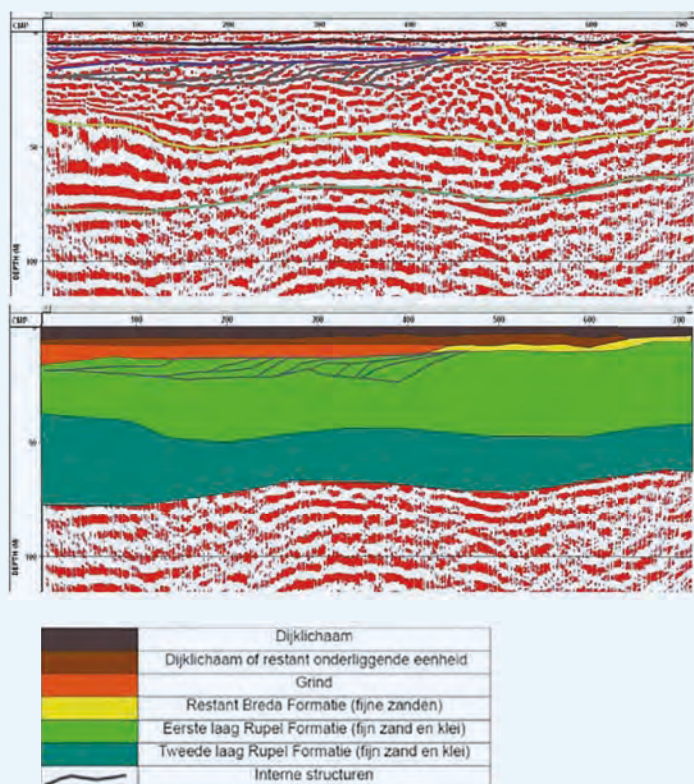


IR sensor op een terreinwagen bevestigd

Lopende ontwikkelingen
<ul style="list-style-type: none"> Algoritmes ontwikkelen die automatisch kwel detecteert uit de data. IR metingen met drone.

D6. Reflectie seismiek

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkelfase		
	2D (hor.)	In-situ Lab	€€€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Doorontwikkelde techniek. Niet toegepast voor piping onderzoek.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X*	X*				X*	X*	
* lokale correlatie met boring of sondering vereist.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€,,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		



Voorbeeld van reflectie seismiek voor het Julianakanaal [17]. Bovenste paneel geeft de meest relevante reflecties weer, het onderste paneel de indeling van de ondergrond in eenheden.

Omschrijving

Bij reflectie seismiek wordt door middel van een seismische bron trillingen opgewekt. Vanaf de bron plant de golf zich voort in de ondergrond waarbij de snelheid en demping van de voortplanting van de golven afhankelijk zijn van het type ondergrond. Bij een overgang naar een andere type ondergrond wordt een deel van de seismische energie gereflecteerd welke wordt opgevangen met geofoons, terwijl een ander deel zich dieper voorplant in de ondergrond. Hierdoor kunnen verschillende lagen onderscheiden worden tot een diepte van 75 m.

Aandachtspunten

Planfase	
Uitvoering	
Uitwerking	<ul style="list-style-type: none"> Correlatie m.b.v. boor- en sondeergegevens.

Voordelen

- Hoog dieptebereik (tientallen meters).

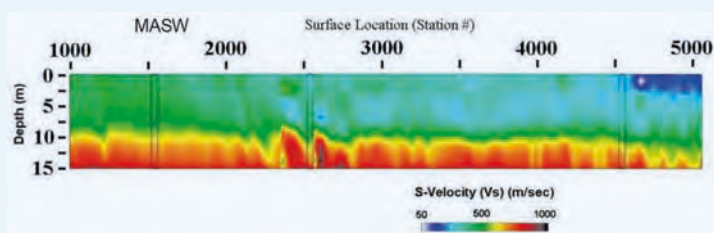
Nadelen

- Resolutie is slechts 10 – 20% van de diepte (op 20 m diepte enkel lagen > 2 m zichtbaar).
- Vaak verstoring door verkeersbelasting, wind, regen en zee.

Lopende ontwikkelingen

D7. Multikanaal analyse van oppervlaktegolven

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkelfase		
MASW	2D (hor.)	In-situ tab	€€€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Doorontwikkelde techniek. Zelden toegepast voor piping onderzoek.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X*	X*				X*	X*	
* lokale correlatie met boring of sondering vereist.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€€,€€,€€€	Kosten goedkoop tot duur		



Voorbeeld MASW meting, waarin de rode kleur zand indiceert [18]

Omschrijving

MASW is een seismische methode die de overgang van het type ondergrond meet met behulp van oppervlaktegolven. Deze golven verplaatsen zich over de grond of waterbodem. Er wordt vervolgens een diepteprofiel afgeleid uit de relatie tussen de frequentie van de golven en de snelheden waarmee deze reizen met behulp van inversie van de schuifgolfsnelheid.

Aandachtspunten

Planfase	<ul style="list-style-type: none"> Plannen hoe diep in de ondergrond je wilt meten. Deze techniek wordt voornamelijk ingezet vanaf 20 meter.
Uitvoering	
Uitwerking	

Voordelen

- Hoog dieptebereik.

Nadelen

- Resolutie is slechts 10 – 20% van de diepte.
- Vaak verstoring door verkeersbelasting, wind, regen en zee.

Lopende ontwikkelingen

- Microtremor; passieve techniek welke achtergrondgeluid gebruikt als bron.

D8. Gammastralingsensor

Naamgeving	1D, 2D, 3D	Type?	Kosten	Detailniveau	Ontwikkelfase		
	2D (hor.)	In-situ Lab	€€€	Eenvoudig Gedetailleerd Maatwerk	Zelden toegepast voor piping onderzoek.		
d	L-D	Y	$k_{v,d}$	D70	D	L-Z	$k_{h,z}$ $k_{v,z}$
Dikte deklaag	Opbouw deklaag	Gewicht deklaag	Doorlatendheid deklaag (vert.)	Korrelgrootte top zandlaag	Dikte zandlaag	Opbouw zandlaag	Doorlatendheid zandlaag (vert. horiz.)
X*	X*						
* lokale correlatie met boring of sondering vereist.							
X	Voorkeursmethode			C	Parameter via correlatie		
X	Levert parameter			€,,€€€	Kosten goedkoop tot duur		

Omschrijving

In de bodem komen natuurlijke radioactieve stoffen voor in zeer lage concentraties. De gammastralings-sensor meet deze radioactiviteit om de samenstelling van de ondergrond te achterhalen. Elke grondsoort heeft zijn eigen hoeveelheid radioactieve sporen; zo heeft klei van nature een hogere radioactiviteit dan zand. Op deze manier kan men verschillende mineralen en bodemtypen onderscheiden en de vertaling maken naar de samenstelling van de ondergrond. Daarnaast kan men de grondeigen radioactiviteit koppelen aan verschillende grondeigenschappen in de grond (bijv. korrelgroottefractie en zandgehalte). Het dieptebereik van deze techniek is slechts 0,3 tot 0,5 m.



Resultaat Gammaspectrometer Proeftuin Mastenbroek [4]

Aandachtspunten

Planfase	• Kies een platform uit waarin de sensor bevestigd kan worden die geschikt is voor desbetreffende terreinomstandigheden.
Uitvoering	
Uitwerking	

Voordelen

- De grondeigen radioactiviteit kan gekoppeld worden aan verschillende eigenschappen in de grond (korrelgroottefracties, zandgehalte, organische stof).

Nadelen

- Resolutie dieptebereik is slechts 0,3 tot 0,5 m.

Lopende ontwikkelingen



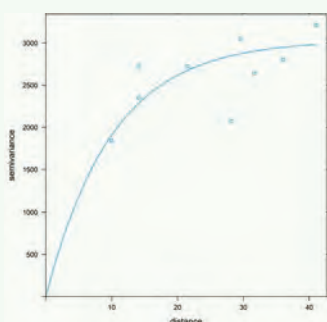
E Correlatielengten en variatiecoëfficiënten

Een van de belangrijkste, en tevens lastigste, vraagstukken in de geotechniek zijn de afstanden waarover de geotechnische parameters in de ondergrond variëren. Kennis hierover vormt echter wel de basis van een goed grondonderzoeksplan. Hieronder wordt per parameter een beeld geschetst van de afstanden waarover deze kan variëren. De afstanden zijn gebaseerd op resultaten van POV Piping Verkenningen. Tevens wordt geschetst hoe, indien nodig, op projectbasis de variatie in beeld kan worden gebracht.

E.1 Achtergrond bij ruimtelijke variatie

E.1.1 Correlatielengte

Het getal wat iets zegt over de ruimtelijk variatie in waarnemingen is de correlatielengte. Correlatielengten zijn er op verschillende schalen: van een delta-schaal (heel Nederland) tot een micro-schaal (laagjes van een millimeter tot centimeter dikte). Binnen de correlatielengte zijn metingen nog met elkaar te correleren. Zodra er op een afstand groter dan de correlatielengte gekeken wordt, kan er van worden uitgegaan dat deze resultaten onafhankelijk zijn van elkaar. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 6. Hier is de semivariantie uitgezet tegen afstand. Uit deze grafiek kan de correlatielengte afgelezen worden, en zit deze rond de 30 à 40 m vanaf het grondonderzoekspunt. Vanaf dit punt zie je dat ongeacht de afstand, de semivariantie ongeveer gelijk blijft. Oftewel, vanaf dit punt kan er worden uitgegaan dat de resultaten onafhankelijk zijn van elkaar.



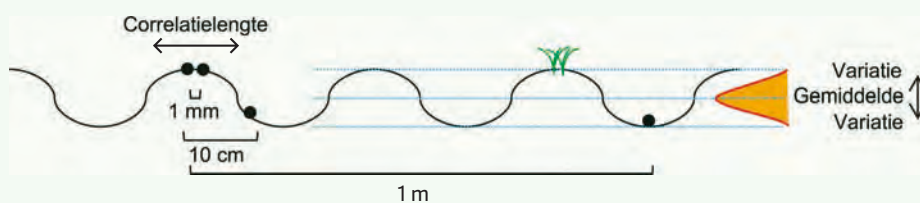
Figuur 6 Semivariantie van D70 uitgezet tegen afstand, resultaten van proeftuin te Loo uitgevoerd door Hogeschool Larenstein

E.1.2 Variatiecoëfficiënt

Daarnaast is de variatiecoëfficiënt belangrijk. De variatiecoëfficiënt is een relatieve spreidingsmaat, en is gelijk aan de standaarddeviatie gedeeld door het gemiddelde. De variatiecoëfficiënt is onafhankelijk van de correlatielengte, maar geeft bijvoorbeeld aan hoeveel afwijking je zou kunnen verwachten wanneer je buiten je correlatielengte komt. Een voorbeeld dat beide definities wellicht verduidelijkt is weergegeven in het volgende kader.

Voorbeeld correlatielengte en variatie van een grasveld

Stel je voor dat je de hoogte van een grasveld met graspollen wilt bepalen. Wanneer je de eerste meting uitvoert midden op een graspol, en je doet vervolgens op 1 mm daar vandaan een tweede meting, dan is het zeer waarschijnlijk dat je dezelfde waarde vindt. Doe je echter 10 cm verderop de tweede meting dan is het te verwachten dat je niet dezelfde waarde vindt, doordat je dan naast die eerste graspol meet. Meet je 1 m verderop, dan zit je ruimschoot buiten die eerste graspol en is het aantreffen van dezelfde hoogte vooral toeval. Je kan net zo goed de hoogte van de grond naast de graspol meten. De hoogteverschillen in het veld worden bepaald door de variatiecoëfficiënt, terwijl de omvang van de pollen de correlatielengte bepaald.



Als de variatiecoëfficiënt bekend is, kan een inschatting van de minimaal benodigde monsters gemaakt worden voor een bepaalde gewenste foutmarge. Deze inschatting gebeurt op basis van de statistische rekenregels zoals beschreven in bijvoorbeeld (Calle, Förster, van den Ham, & Kruse, 2012) bijlage B.7. In algemene zin kan worden gesteld dat meer monsters altijd een beter inzicht in de verdeling geven; er is nadrukkelijk geen sprake van een 'goed' of 'fout' aantal monsters. Echter, te weinig monsters kan ertoe leiden dat er te voorzichtig beoordeeld of, in geval van ontwerp, te robuust ontworpen is. De karakteristieke schatting wordt immers in dat geval zeer laag. Alternatief kan er te veel bemonsterd worden, waarbij veel geld aan metingen wordt uitgegeven terwijl het geen wezenlijk verschil in bijvoorbeeld het ontwerp oplevert. Naast de variatiecoëfficiënt is het gewenste aantal monsters dus afhankelijk van de nauwkeurigheid die men wil bereiken (foutmarge). Dit kan bijvoorbeeld samenhangen met:

- Voorkennis; we verwachten dat deze parameter hier niet heel relevant is ('De deklaag is hier zo dik, dat opbarsten niet gaat gebeuren.').
- Projectfase; we doen eerst een voorlopige beoordeling/schetsontwerp, en op basis van die resultaten gaan we het grondonderzoek uitbreiden indien nodig. Hierdoor worden kosten pas gemaakt wanneer deze echt nodig zijn en levert dit besparingen op.

In paragrafen E2 t/m E7 wordt per parameter, en gebaseerd op de bevindingen uit de POV Piping, een beeld geschetst van de correlatielengten, welke in heel Nederland toepasbaar zijn. Indien van toepassing worden de variatiecoëfficiënten voor die parameter ook genoemd. In combinatie met de rol die deze parameter in het pipingproces vervuld, is vervolgens beoordeeld met welke ruimtelijke nauwkeurigheid de parameter bij voorkeur bekend zou moeten zijn. Daarnaast wordt aangegeven hoeveel monsters tot welke foutmarge in de parameterschatting leidt. Hierbij is uitgegaan van een lokaal waarnemingenbestand. Er dient geverifieerd te worden of er sprake is van regionale verschillen en/of ruimtelijke trends in de datasets. Op basis hiervan is in hoofdstuk 6 een voorstel gedaan voor een principe grondonderzoekplan.

E.2 Deklaagdikte

E.2.1 Variaties in horizontale richting

In diverse onderzoeken binnen de pov Piping is de variatie en variatielengte van de deklaagdikte onderzocht. Uit [4] en [5] blijkt dat de correlatielengte ca. 15 à 30 m bedraagt. Daarnaast is bekend dat restgeulen en strangen vaak opgevuld zijn met klei en daarmee een lokale verdikking van de deklaag kunnen verklaren. Op basis van figuur 4 uit [11] blijkt dat deze een breedte hebben van ca. 50 m. Uit [5] blijkt dat een daar aangetroffen opgevulde restgeul een breedte heeft van ca. 15 m. Uit een analyse van in het AHN zichtbare restgeulen verspreid over Nederland, blijkt dat opgevulde restgeulen en strangen overwegend een breedte hebben tussen de 10 en 50 m (zie tabel 7).

Eenheid	Typische breedte ¹⁾
Wiel	50 – 100 m
Opgevulde restgeul / Strang	10 – 50 m, lengte ca. 300 à >1000 m
Kronkelwaard / Platen en slikken	Bovenrivierengebied: 50 à 150 m, lengte ruggen ca. 300 à 1000 m. Benedenrivieren / Kust: 100 à 1000 m
Komgronden	> 100 m

¹⁾ Gebaseerd op USACE (1956) en een analyse van in het AHN zichtbare eenheden bij Doesburg, Westervoort, Beneden-Leeuwen, Zaltbommel, Broekhuizen, Macharen, Amerongen, Werkendam, Sint-Annaland, IJsselmuiden, Bunschoten, Texel.

Tabel 7 Variaties deklaagdikte in horizontale richting

E.2.2 Vereiste dichtheid van onderzoek

Het opbarsten van een deklaag is een zeer lokaal proces, kleiner dan de gevonden correlatielengte. Ook een eventuele zandopduiking in het voorland, bij een dunne deklaag, kan kleiner zijn dan deze correlatielengte. Om een goede beoordeling op piping mogelijk te maken, dient de deklaagdikte daarom om de 15 à 30 m bekend te zijn, tenzij de deklaagdikte in de beoordeling of de gekozen ontwerplossing geen wezenlijke rol speelt. Deze nauwkeurigheid is over grotere afstanden haalbaar door geofysische meettechnieken (vlakdekkende technieken) toe te passen.

E.3 Verticale doorlatendheid deklaag

E.3.1 Variaties in horizontale richting

De horizontale variatie in doorlatendheid van kleilagen hangt samen met de korrelverdeling van de deklagen (bijv. verhouding zand versus lutumgehalte) en de mate van bioturbatie of andersoortige grondroering. Voor de variatie in korrelverdeling zijn in hoofdzaak dezelfde afzettingsprocessen verantwoordelijk die ook de variatie in deklaagdikte veroorzaken. Het wordt daarom verondersteld dat de horizontale correlatielengten van de deklaagdikten (± 15 à 30 m) ook bruikbaar zijn voor de horizontale correlatielengte van de samenstelling en daarmee doorlatendheid.

E.3.2 Variaties in verticale richting

De variatie in de verticale richting is in [6] onderzocht door op verschillende diepten grote diameter doorlatendheidsmetingen uit te voeren (dit is vermeld in [19]). Hieruit volgt dat de doorlatendheid van de top van een kleideklaag hoog is (± 1 m/d). De doorlatendheid in de top komt overeen met de waarden die genoemd worden in het Technisch Rapport 'Klei voor dijken' [20]. Hierbij is een recent aangebrachte kleilaag bekeken waarvan de doorlatendheid in het eerste half jaar na aanleg was toegenomen tot $0,8$ m/d als gevolg van scheurvorming door drogen en structuurvervorming door o.a. bioturbatie. Geconcludeerd wordt dat de toplaag geen noemenswaardige weerstand oplevert voor het pipingvraagstuk. Doordat met name klei aan het oppervlak hiervoor gevoelig is, kan op grotere diepte ($>0,5$ à 1 m) de doorlatendheid aanzienlijk lager zijn [6]. Op deze diepte varieert de doorlatendheid ook tussen lagen; uit het COW onderzoek blijkt uit laboratoriumtesten dat de lagen met een vergelijkbare doorlatendheid een dikte hebben van ca. $0,2$ à $0,5$ m.

E.3.3 Vereiste dichtheid van onderzoek

De infiltratie van water in het voorland door een deklaag is een proces wat groter is dan de correlatielengte. Iets meer infiltratie op de ene locatie kan gecompenseerd worden door wat minder infiltratie op een andere locatie. De verticale doorlatendheid hoeft daarom niet om de 15 à 30 m horizontaal en $0,2$ à $0,5$ m verticaal bekend te zijn. Wel dient inzicht aanwezig te zijn in de verdeling van doorlatendheden, om te voorkomen dat met te gunstige waarden beoordeeld of ontworpen wordt. Aantallen zijn nog niet te noemen, omdat er geen gegevens bekend zijn over de variatiecoëfficiënt van de verticale doorlatendheid. Naast de verticale doorlatendheid in het voorland, spelen de dikte van de deklaag en de lengte van het voorland een grote rol. Indien bijv. de dikte groter dan 3 m is en het voorland is aanzienlijk lang (>100 m), dan is de kans dat piping optreedt aanzienlijk klein. In het beoordelingsinstrumentarium is de verticale doorlatendheid van de deklaag in het voorland indirect opgenomen in de aanwezige kwelweglengte.

E.4 Volumegewicht deklaag

E.4.1 Variaties in horizontale richting

Het gewicht van de deklaag hangt samen met de korrelverdeling. Voor de variatie in korrelverdeling zijn in hoofdzaak dezelfde afzettingsprocessen verantwoordelijk die ook de variatie in de deklaagdikte veroorzaken. Verwacht wordt daarom dat de horizontale correlatielengten van de deklaagdikten (± 15 à 30 m) ook bruikbaar zijn voor de horizontale correlatielengten van het gewicht van deklaag (of sublagen hierbinnen).

E.4.2 Variaties in verticale richting

De verticale variatie in samenstelling (gewicht) van de deklaag hangt samen met afzonderlijke lagen. Verwacht wordt dat dit globaal gelijk is aan de correlatielengte van de doorlatendheid in de verticale richting. Dit leidt dan tot verticale correlatielengten met een vergelijkbare orde grootte als de doorlatendheid voor het gewicht van de deklaag (ca. 0,2 à 0,5 m).

E.4.3 Vereiste dichtheid van onderzoek

Bij het opbarsten spelen verschillende lagen binnen de deklaag een rol. De samenstelling van de deklaag hoeft daarmee dus niet om de 15 à 30 m horizontaal en iedere 0,2 à 0,5 m verticaal bekend te zijn. Wel dient inzicht aanwezig te zijn in de verdeling van volume gewichten, om te voorkomen dat met te gunstige waarden beoordeeld of ontworpen wordt.

Op basis van een variatiecoëfficiënt van 0,05 (NEN9997-1) is in tabel 8 het aantal monsters bij verschillende nauwkeurigheden weergegeven. Dit gaat dus om het aantal monsters per sublaag binnen de deklaag. Dit houdt in dat voor bijvoorbeeld 3 aanwezige lagen (achtereenvolgens een zandige kleilaag, siltige kleilaag en veenlaag) voor iedere laag dit aantal bepalingen benodigd is om de gewenste nauwkeurigheid te behalen. Deze aantallen gelden voor de volledige lengte waarover geen structurele afwijking in de parameter wordt verwacht.

Bron variatie-coëfficiënt volumegewicht	Variatie-coëfficiënt	Aantal monsters n (foutmarge 2%)	Aantal monsters n (foutmarge 5%)	Aantal monsters n (foutmarge 10%)
NEN 9997-1	0,05	19	5	3

Tabel 8 Aantal benodigde monsters voor een bepaalde foutmarge voor het volumegewicht

E.5 Korrelverdeling van de zandlaag (D70)

E.5.1 Variaties in horizontale richting

In diverse onderzoeken binnen de POV Piping is de variatie van de D70 op meso-schaal onderzocht. Hoewel er ook sprake is van variatie op microschaal, is dit binnen de POV Piping niet onderzocht. Uit [4] en [5] blijkt dat de horizontale correlatielengte ca. 20 à 40 m bedraagt. In [4] gaat het om de correlatielengte in dekzand. In [5] gaat het om de correlatielengte in rivierzand (kronkelwaard). De gevonden correlatielengte betreft echter een combinatie van een lokaal aanwezig restgeul met significant grover zand en kronkelwaardafzettingen. De genoemde correlatielengte heeft daarom geen betrekking op bijvoorbeeld alleen de eenheid 'kronkelwaard'. In een beschrijving van sedimentologische structuren in [7] worden de afmetingen van de kleinere beddingstructuren weergegeven die de basis vormen van de variatie in D70. De afmetingen van deze structuren bedragen 3 à 8 m. Echter uit onderzoeken bij IJzendoorn, Veecaten en Loo wordt een correlatielengte van 20 à 40 m gevonden.

E.5.2 Vereiste dichtheid in onderzoek

Bij het pipingproces gaat het om kwelweglengten in de orde van tien tot enkele honderden meters. Dit is groter dan de hierboven beschreven correlatielengten van de korrelgrootte. De korrelverdeling hoeft daarom niet om de 3 à 20 m horizontaal bekend te zijn. Wel dient er inzicht aanwezig te zijn in de verdeling van korrelgrootten (door bijv. zevingen op monsters uit te voeren), om te voorkomen dat met te gunstige waarden beoordeeld of ontworpen wordt.

Hoeveel zevingen uitgevoerd dienen te worden, is onder meer afhankelijk van het type afzetting; dekzanden hebben een lagere variatiecoëfficiënt dan rivierafzettingen waardoor voor een dekzandafzetting met minder proeven kan worden volstaan. In tabel 9 is voor een aantal variatiecoëfficiënten en nauwkeurigheden de minimale omvang van de steekproef berekend.

Bron variatiecoëfficiënt D70	Variatiecoëfficiënt	Aantal monsters <i>n</i> (foutmarge 2%)	Aantal monsters <i>n</i> (foutmarge 5%)	Aantal monsters <i>n</i> (foutmarge 10%)
Dekzand [4]	0.09	60	11	5
WBI [2] (afzettingseenheid onbekend)	0.12	100	18	6
Rivierzand [5] ¹⁾	0.26	460	75	20

¹⁾ Proevenverzameling bevat een kronkelwaard en een restgeul, met een duidelijk verschillende D70, waardoor de variatiecoëfficiënt mogelijk hoger is uitgevallen.

Tabel 9 Aantal benodigde monsters voor een bepaalde foutmarge voor de D70

Voor het uitvoeren van zevingen wordt gebruik gemaakt van standaard zeefmaten. Deze zijn gegeven in tabel 10. Bij het gebruik van deze maten kunnen echter grote afwijkingen ontstaan in de geïnterpoleerde korrelgroottes (zo ook de D70). Dit komt doordat de standaard zeefmaten vrij uiteen lopen, waardoor de meest aanwezige korrelgroottefracties tussen zeefmaten in vallen [8]. Om deze reden wordt aanbevolen extra zeven te plaatsen, welke afhankelijk zijn van de beschreven korrelgrootte van het zand. Ook deze maten zijn in tabel 10 gegeven.

Beschreven korrelgrootte van het zand	(Extra benodigde) zeefmaten [μm]
Nog onbekend, gebruik standaard zeefmaten	63, 125, 250, 500, 1000, 2000
Zand uiterst fijn	Zeefmetingen niet gewenst, gebruik van aerometer
Zand zeer fijn	Zeefmetingen niet gewenst, gebruik van aerometer
Zand matig fijn	125, 150, 180, 212, 250
Zand matig grof	212, 250, 300, 355, 425, 500
Zand zeer grof	250, 300, 355, 425, 500
Zand uiterst grof	500, 600, 710, 800, 850, 900, 1000

Tabel 10 Zeefdiameters

E.6 Zandlaagdikte

Binnen de POV Piping is geen specifiek onderzoek gedaan naar de zandlaagdikte die wordt meegenomen in pipinganalyses. Het schematiseringsprobleem duikt echter wel op in de verkenning Mastenbroek [4], Intredeweerstand [19] en Leem+grind [14]. Hieruit volgt dat een dikte van 15 of 30 m wel degelijk invloed heeft. Daarnaast heeft de onderste helft soms wel een vijf maal lagere doorlatendheid.

De dikte kan worden bepaald door sonderingen en/of boringen. Bij dikke pakketten wordt vaak een conservatieve schatting van de onderzijde van het watervoerend pakket gehanteerd op basis van archiefgegevens. Pipinganalyses zijn veelal niet erg gevoelig voor een kleine wijziging in deze parameter. Specifiek onderzoek voor dit doel is dan ook niet gebruikelijk, al kunnen boor- of sondeertechnieken zoals waterspanningssonderingen of HPT sonderingen deze onderkant wel in beeld brengen. De correlatielengte van de zandlaagdikte is niet specifiek onderzocht binnen de POV Piping.

E.7 Doorlatendheid zandlaag (k_z)

De nauwkeurigheid waarmee de doorlatendheid van de zandlaag bekend dient te zijn, is afhankelijk van het model dat in de analyse toegepast zal worden. Waar voorheen voor piping altijd met een analytisch model met één watervoerende zandlaag werd gerekend, bieden de huidige numerieke modellen de mogelijkheid om de grondwaterstroming bij pipingvraagstukken op een hoger detailniveau te modelleren. Er kunnen lagen van 5 m dikte, of zelfs dunnere lagen, worden gemodelleerd. De beoordeling of het ontwerp wordt daarmee realistischer. Een hoger detailniveau in de modellering betekent echter ook een hoger detailniveau van het grondonderzoek (en dan niet enkel voor het bepalen van de doorlatendheid), omdat anders de informatie ontbreekt om het gedetailleerdere model te voeden.

Onderstaand wordt achtereenvolgens ingegaan op de verschillende detailniveaus, en hiermee samenhangende correlatielengten. Daarna wordt een beschrijving gegeven van de nauwkeurigheid en toepasbaarheid voor pipingonderzoek van verschillende typen doorlatendheidsmetingen.

E.7.1 Modellering op niveau hele watervoerende pakketten (Deltaschaal dikten >10 m)

Modellering op dit niveau, het 1-laags analytisch model, was tot voor kort de gangbare analysemethode voor piping. Voor nu wordt dit model enkel voor de gedetailleerde toets nog toegepast. Pompproeven, MPT/HPT sonderingen en glasvezel sondeertechnieken kunnen allen worden ingezet op dit schaalniveau. Correlatielengten op dit niveau zijn niet onderzocht binnen de pov Piping. De verwachting is dat het gaat om correlatielengten op het niveau van kilometers.

E.7.2 Modellering op niveau: formaties (dikte lagen 1 à 10 m)

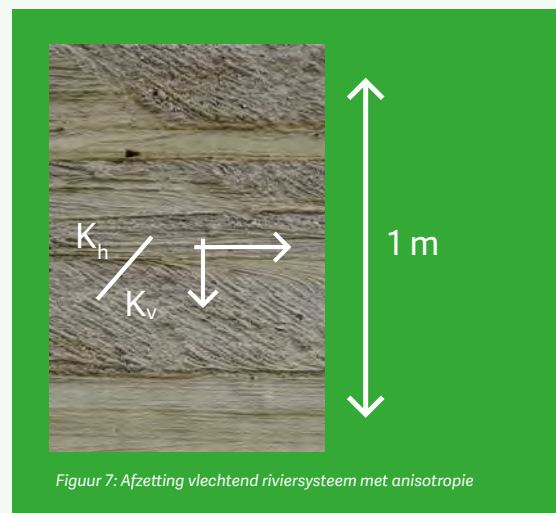
Met de huidige generatie numerieke modellen is het mogelijk om op dit niveau variaties mee te nemen in de pipinganalyse. Slugtesten, korrelverdelingen, (MPT mini) pompproeven, alsmede HPT sonderingen kunnen worden uitgevoerd op dit schaalniveau (pakketten met een dikte van ca. 5 à 10 m). De correlatielengte is onderzocht in [9]. De horizontale correlatielengten die hierbij gevonden zijn, bedragen ca. 200 à 300 m.

E.7.3 Modellering op niveau individuele zandlagen (dikte lagen 0,1 m à 1,0 m)

Met de huidige generatie numerieke modellen is het mogelijk om op dit niveau variaties mee te nemen in de pipinganalyse. HPT sonderingen kunnen worden uitgevoerd op dit schaalniveau. In [9] zijn voor de HPT sondering de correlatielengten onderzocht. De verticale correlatielengte bedroeg hier ca. 0,6 m en horizontale correlatielengte ca. 20 m. Deze schaal lijkt representatief voor individuele sedimentaire structuren/zandlagen (zie ook afmetingen in [7]).

E.7.4 Variaties in verticale richting: anisotropie (dikte lagen 1 mm tot 1 cm)

Ook binnen individuele zandlagen komt variatie voor. Het gaat hier om een sub-gelaagdheid met grovere en fijnere lagen van enkele millimeters tot centimeters dikte en/of korrels met een voorkeursoriëntatie (figuur 7). Het resultaat uit zich vaak als anisotropie. Anisotropie wordt vaak gezien als een bulkeigenschap van het materiaal. Er is in het kader van de pov Piping wordt onderzoek uitgevoerd naar anisotropie bij Waterschap Hollandse Delta.



Figuur 7: Afzetting vlechtend riviersysteem met anisotropie

E.7.5 Vereiste dichtheid van onderzoek

Het detailniveau van het onderzoek naar de doorlatendheid (svariantie) van het zandpakket is afhankelijk van het gewenste realiteitsniveau van de pipinganalyse, en daarmee het detailniveau waarop gemodelleerd gaat worden. Bij het pipingproces gaat het om grondwaterstroming in een grondlichaam van veelal >10.000 m³. Dit is groter dan de hierboven beschreven correlatielengten van de doorlatendheid. De doorlatendheid hoeft daarom niet bekend te zijn op de kleinste niveaus van hiervoor genoemde schalen. Wel is het zo dat inzicht in de verdeling van de doorlatendheid gewenst is, om te voorkomen dat met te gunstige waarden beoordeeld of ontworpen wordt. In de volgende alinea's wordt een inschatting gegeven per schaal wat de vereiste dichtheid van onderzoek moet zijn.

Deltaschaal

Om een goede analyse mogelijk te maken dient de doorlatendheid over het hele pakket, en om de ca. 1.000 m, bekend te zijn. Deze nauwkeurigheid is haalbaar door pomp-proeven of peilbuismeetnetten toe te passen, of gebruik te maken van archiefgegevens, zoals de REGIS modellen.

Formatieschaal (macroschaal)

Om een goede analyse mogelijk te maken dient de doorlatendheid horizontaal om de 200 à 300 m bekend te zijn, en verticaal op formatieschaal (ca. 1 à 10 m). Deze nauwkeurigheid is haalbaar door HPT-MPT sonderingen, (MPT mini-)pompproeven of mechanische boringen met korrelverdelingen toe te passen. Daarnaast kunnen ook slugtesten toegepast worden. Met het gebruik van slugtesten dient echter rekening te worden gehouden met een opschaling i.v.m. het schaafeffect in doorlatendheidsmetingen. Uiteraard kan de afstand tussen onderzoekspunten worden vergroot indien gebiedskennis en expertise deskundigen wordt ingeschakeld.

Schaal individuele zandlagen (mesoschaal)

Om een goede analyse mogelijk te maken dient de doorlatendheid op de schaal van individuele zandlagen bekend te zijn, te weten ca. 20 m horizontaal en 0,6 m verticaal. Deze nauwkeurigheid is haalbaar door HPT sonderingen of mechanische boringen met korrelverdelingen in te zetten. Binnen de POV Piping heeft onderzoek op dit niveau plaats gevonden [13], maar in de dagelijks beoordelings- of ontwerppraktijk zal een analyse zelden tot nooit op een dergelijk klein schaalniveau plaats vinden, aangezien zeer intensief veldonderzoek noodzakelijk is.

Anisotropie (microschaal)

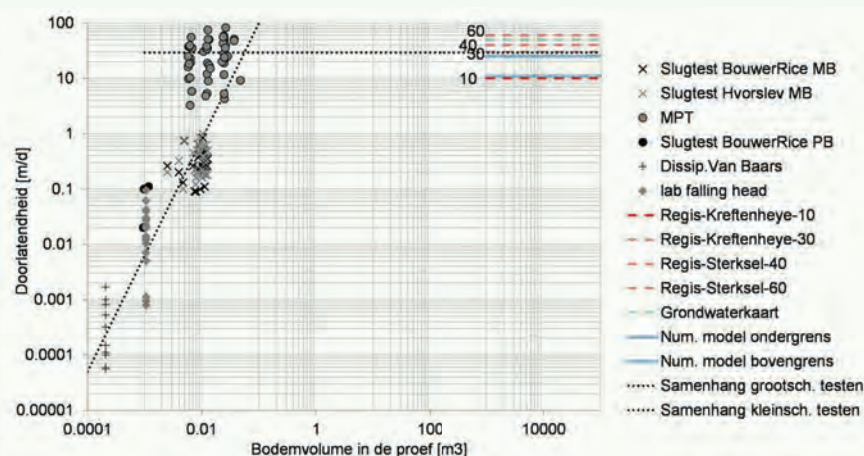
Anisotropie is niet als individuele losse lagen te meten, maar wel als bulkeigenschap. Het effect van anisotropie is toe te passen binnen numerieke modellen op Delta- Macro- of Mesoschaal. Anisotropie kan worden gemeten met speciaal hiervoor ontworpen pompproeven en middels de HPT-AMPT sondering. De afstand tussen datapunten en/of aantal datapunten per formatie is nog onderwerp van lopende onderzoek bij Waterschap Hollandse Delta.

E.7.6 Schaafeffect doorlatendheidsmetingen

Binnen de POV Piping is in de Verkenning 'Doorlatendheid en Sondeertechniek' onderzoek gedaan naar de variatie van doorlatendheid in de zandlaag [21]. Een belangrijk aspect wat hierin is gevonden, is dat de omvang van de proef grote invloed heeft op het resultaat: het schaafeffect. Figuur 8 laat een voorbeeld zien van dit schaafeffect. Tot een bepaald bodemvolume dat meewerkt in de proef is er een lineaire relatie tussen het bodemvolume

en de doorlatendheid. Na dit bodemvolume maakt de grootte van het volume niet meer uit voor de doorlatendheid, en is deze gelijk voor elk volume.

Als de doorlatendheid van een laboratoriumproef vergeleken wordt met de resultaten van grootschalige(re) testen, zoals een MPT (mini-pompproef; wordt uitgevoerd met een HPT sondering) en pompproeven, wordt er met de laboratoriumproef dus een kleinere doorlatendheid gevonden. Voor piping, met een in de grondwaterstroming betrokken bodemvolume van $>>1$ m³, geldt daarmee dat grootschalige proeven (pompproeven, peilbuismeetnetten en HPT sonderingen / MPT mini-pompproeven) het meest geschikt zijn voor een pipinganalyse.



Figuur 8 Relatie doorlatendheid en schaalgrootte proef [21]. Bodemvolume is een indicatieve maat en is in werkelijkheid afhankelijk van bergings- en doorlatendheidseigenschappen.

E.7.7 Variatie in korrelverdelingen

Korrelverdelingsmethoden (o.a. Den Roojen/Beijer en Hazen) zijn ook onderzocht in de Verkenning 'Doorlatendheid en Sondeertechniek'. In algemene zin kan gesteld worden dat deze methoden niet in staat waren op voorhand verwachte variaties in doorlatendheid van het pakket aan te tonen. Tevens maakt het veel verschil uit welke methode wordt gekozen. De in Nederland veel toegepaste methode Den Rooijen leidde tot een onderschatting van de doorlatendheid. De correlatielengten van de korrelverdelingsmethoden bedroegen ca. 100 à 200 m.



Bijlagen



 College van Dijkgraaf en Heemraden
van Waterschap Rivierenland
Postbus 599
4000 AN Tiel

Onderwerp: Advies Handreiking grondonderzoek voor piping
Datum: 24 juni 2019
Bijlagen: 1
Afschrift aan: DGWB, Heij,
WSRL, Van der Veen,
POV-P, De Jong.

Ons kenmerk: 19-03
Uw kenmerk: 2019060679/2019060695
Contactpersoon: ir. M. Hazelhoff
Functie: Coördinator ENW
E-mail: marieke.hazelhoff@rws.nl
Telefoon: 06-46935746

Geacht college,

In de brief van ir. J.B. van der Veen, opdrachtgever van de POV-Piping, gedateerd op 10 mei 2019, wordt het ENW om advies gevraagd over de 'Handreiking Grondonderzoek voor Piping'.

De 'Handreiking Grondonderzoek voor Piping' geeft een overzicht van grondonderzoekstechnieken die geschikt zijn voor pipinganalyses bij Nederlandse waterkeringen. Belangrijk is zich te realiseren dat in de praktijk ook grondonderzoek voor andere faalmechanismen nodig is. De POV-Piping geeft dan ook zelf aan dat integratie van het grondonderzoeksplan voor piping, heave en opbarsten met grondonderzoek voor andere doeleinden noodzakelijk is. Het ENW deelt deze aanbeveling.

Het ENW vindt het een mooi, kort en bondig opgezet rapport, voorzien van factsheets met ter zake doende parameters. De standaard factsheet is een goed uitgevoerd initiatief dat navolging verdient. Voor de definitieve uitwerking van het document heeft het ENW enkele aanbevelingen ten aanzien van de inhoud en de structuur.

Het document beschrijft de aanpak van een (gedetailleerd) pipingonderzoek en gaat vooral in op het grondonderzoek ten behoeve van de wettelijke beoordeling en in mindere mate op het ontwerp. Aanvullend op de Handreiking wordt er door de POV ook gewerkt aan een document ten behoeve van het waterspanningsbeeld. Het verdient aanbeveling om deze twee samen te voegen.

Om het rapport van grotere toegevoegde waarde te laten zijn, beveelt het ENW aan meer structuur aan te brengen door bijvoorbeeld een overzicht toe te voegen waarin onderscheid wordt gemaakt tussen de meest gebruikte technieken en technieken met een hele specifieke toepassing. Beproefde en nieuwere technieken worden beide genoemd, maar niet geclassificeerd. Dit zou wel van meerwaarde zijn. Ook zou het mooi zijn wanneer uiteindelijk een paar voorbeelden worden uitgewerkt waarbij alle stappen vanaf het begin (grondonderzoek) tot het einde (monitoring) worden beschreven.



De aanbevolen werkwijze van grof naar fijn is volgens het ENW niet altijd de beste. In sommige gevallen is (relatief) veel onderzoek in de beginfase beter. Feitelijk moet steeds een afweging gemaakt worden over de hoeveelheid en soort onderzoek passend bij het doel en de fase van het project. Dit kan ook buiten de beheerzone zijn. Grondonderzoek wordt idealiter voor een langere periode uitgevoerd en niet alleen voor een beoordeling. Dit geldt ook voor de uit te vragen kenmerken van de ondergrond. Het in 2017 door het ENW uitgebrachte advies over Veldmetingen en Monitoren biedt hiervoor de nodige aanknopingspunten.

Samenvattend komt het ENW tot de volgende bevindingen:

- Het rapport is voldoende onderbouwd. De beschreven technieken komen uit bestaande, veel gebruikte publicaties.
- De toepassingen zijn voldoende omschreven, maar de toepassingsrandvoorwaarden verdienen nog aandacht.
- De Handreiking is een nuttige toevoeging, omdat deze de informatie op een beknopte manier weergeeft.
- Het ENW geeft wel in overweging om de naam *handreiking* te heroverwegen omdat het meer een samenvatting is dan een tekst die handvatten biedt, zoals van handreiking verwacht mag worden.

In de bijlage gaan wij nader op de adviesvraag in en vindt u de antwoorden op de deelvragen.

Wij hopen u naar tevredenheid van advies te hebben voorzien.

Hoogachtend,

drs. J.H.M. de Ruig
Waarnemend voorzitter van het Expertise Netwerk Waterveiligheid



Bijlage Toelichting en beantwoording adviesvragen

Inleiding

Onder het Hoogwaterbeschermingsprogramma heeft de Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV-P) in verschillende verkenningen onderzoek gedaan naar de ruimtelijke variatie van relevante parameters voor opbarsten, heave en piping. Voor deze verkenningen zijn in Nederland gangbare en in ontwikkeling zijnde grondonderzoekstechnieken gebruikt. Sommige van deze technieken worden in de praktijk maar weinig toegepast, terwijl de pipinganalyses hier wel mee kunnen worden aangescherpt.

Mogelijk wordt dit veroorzaakt door onbekendheid van een techniek, maar ook is niet altijd duidelijk of een techniek wordt geaccepteerd in bijvoorbeeld een gedetailleerde beoordeling of ontwerp. Daarom is de 'Handreiking Grondonderzoek voor Piping' opgesteld. Deze handreiking geeft een overzicht van grondonderzoekstechnieken die geschikt zijn voor pipinganalyses bij Nederlandse waterkeringen.

Belangrijk is te beseffen dat in de praktijk ook grondonderzoek voor andere faalmechanismen nodig is. De POV-P geeft dan ook zelf aan dat integratie van het grondonderzoeksplan voor piping, heave en opbarsten met grondonderzoek voor andere doeleinden noodzakelijk is.

Adviesvraag

In de brief van ir. J.B. van der Veen, opdrachtgever van de POV-Piping, gedateerd op 10 mei 2019, wordt het ENW gevraagd om advies te geven over de 'Handreiking Grondonderzoek voor Piping' op de volgende onderwerpen:

- Zijn de genoemde technieken voldoende onderbouwd om ze aan de keringbeheerders te kunnen aanbevelen?
- Zijn de toepassingen voldoende omschreven?
- Is de handreiking een nuttige aanvulling op de bestaande publicaties?

Beschikbare informatie

De stukken zijn behandeld in de vergadering van de ENW-werkgroep Techniek op 16 maart 2018. De volgende documenten waren beschikbaar:

- Oplegmemorandum: Handreiking grondonderzoek piping_samenvatting ENW
- Handreiking Grondonderzoek voor Piping (1217-0005-000.R01_v10_handr_GO_POVP)

De heren H. Niemeijer (POV-P) en B. Berbée (Fugro) waren voor een toelichting aanwezig. De formele brief met de adviesvraag is binnengekomen op 21 juni 2019.

Reactie op de deelvragen in de adviesvraag

Deelvraag 1: Zijn de genoemde technieken voldoende onderbouwd om ze aan de keringbeheerders te kunnen aanbevelen?

Het ENW is van mening dat veel van de genoemde technieken bekend zijn bij waterkeringbeheerders. De aanpak voor geofysische metingen en de beschrijving van mogelijke correlatielengtes is nuttig. Een duiding van de toepassingslocaties buiten de Waal en de IJssel is nog wel aan te bevelen.



Het ENW raadt aan ook internationaal te kijken en buitenlandse technieken over te nemen of te verwijzen naar brondocumenten. Er is internationaal veel literatuur en onderzoek voorradig. Informatie is bijvoorbeeld te vinden op de volgende locaties:

- In hoofdstuk 7 van het International Levee Handbook (https://www.ciria.org/ciria/Resources/Free_publications/I_L_H/ILH_resources.aspx).
- De ICold Working Group Internal Erosion (<http://www.icold-cigb.net/>).
- Het EU project Flood Probe (<http://www.floodprobe.eu/project-summary.asp>).
- De website van USACE (<http://www.usace.army.mil/>).

Deelvraag 2: Zijn de toepassingen voldoende omschreven?

De Handreiking is bedoeld om toegepast te worden bij zowel de beoordeling als bij het ontwerp. Het rapport is gebaseerd op pipinggevoelige situaties en de verkenningen bij Waterschap Rivierenland. Bij een faalmechanisme is het type belasting en daarmee het watersysteem van belang. Belastingen op zee- en meerdijken werken anders door dan op rivierdijken, alleen al in piekduur van de storm. Het toepassingsgebied en andere mogelijke beperkingen van de in de handreiking beschreven technieken komen slechts beperkt aan de orde. Ook zou moeten worden toegevoegd hoe men omgaat met de bovenste laag van de ondergrond die een niet-geologische oorsprong heeft. De grond (net) onder het maaiveld is net als de dijk vaak door mensen gemaakt. Een ander voorbeeld is het belang van de invloed van riviermorfologie. Door erosie kan de intredeweerstand afnemen en de kans op piping toenemen. Dergelijke overwegingen komen nog niet terug in de huidige documentatie.

In het algemeen is het belangrijk om aan te geven wat de beperkingen zijn, bijvoorbeeld in termen van toepassingsgebied of belastingsituaties.

Deelvraag 3: Is de handreiking een nuttige aanvulling op de bestaande publicaties?

Het rapport is meer een samenvatting van beschikbare informatie dan een synthesedocument van uitgevoerd onderzoek. Het is daarom relevant dat de juiste referenties worden opgenomen in het document. De titel 'Handreiking Grondonderzoek voor Piping' dekt eigenlijk de lading niet: het gaat feitelijk over waterspanningen. Het bundelen van de beschikbare informatie vindt het ENW wel van toegevoegde waarde.

pov-piping.nl

De Handreiking Grondonderzoek is het kennisdocument voor dijkwerkers ofwel iedere professional die betrokken is bij de versterking van dijken en het tegengaan van het faalmechanisme Piping. Deze handreiking is tot stand gekomen door integratie van de resultaten van diverse POV Piping verkenningen in de periode 2014-2019.

De Handreiking Grondonderzoek is een uitgave van de POV Piping in opdracht van het Hoogwaterbeschermingsprogramma.

Waterschap Rivierenland
Blomboogerd 1
4003 BX Tiel

COLOFON

COPYRIGHT

DEEL DEZE INHOUD MET ZOVEEL MOGELIJK VAKGENOTEN. WE STELLEN HET OP PRIJS ALS U HIEROVER DE UITGEVER INLICHT.

TEKSTEN

DRS. B.M. BERBEE EN IR. F. FENNIS

VORMGEVING

NO CONCEPT NO GLORY, ZWOLLE

POV Piping is onderdeel van het
Hoogwaterbeschermingsprogramma

