

**Lekdetectie in waterremmende
constructies
definitief**

**710104.0002 versie 1
mei 2000**

Inventariserende studie

definitief

710104.0002

mei 2000

N:\projecten.gd\710000\710104\fow\Rapport\
710104.0002 rapport v1.doc

Opgesteld in opdracht van:

DELFT CLUSTER

POSTBUS 69

2600 AB DELFT

AFDELING FUNDERINGSTECHNIEK EN ONDERGRONDSE WERKEN

Projectleider : ing. J.W.M. Lambert

Projectbegeleider: dr. J.K. van Deen

GeoDelft

Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00

Telefax (015) 261 08 21

Postbank 234342

Bank MeesPierson NV

Rek.nr. 25.92.35.911

rapportnr: 710104.0002		datum rapport: mei 2000			
titel en subtitel: Inventariserende studie		behandelende afdeling: Funderingstechniek En Ondergrondse Werken			
		projectnaam:			
projectleider(s): ing. J.W.M. Lambert		projectbegeleider(s): dr. J.K. van Deen			
naam en adres opdrachtgever: Delft Cluster Postbus 69 DELFT		referentie opdrachtgever:			
		verzenden in: -voud			
		type rapport: definitief			
samenvatting rapport: Door GeoDelft is, in opdracht van Delft Cluster, een onderzoek uitgevoerd naar bestaande en potentiële technieken om lekken in civieltechnische waterremmende constructies op te sporen. Het onderzoek bestaat uit inventarisatie door middel van literatuuronderzoek en door middel van vraaggesprekken. De mogelijkheden tot het ontwikkelen van een methode met ruime toepassingsmogelijkheden is afgewogen aan de hand van een aantal binnen dit onderzoek opgestelde criteria. Aanbevolen is om met name de aandacht te richten op geoëlektrische methoden en/of de in Duitsland reeds toegepaste ECR methode, in combinatie met chemische tracers of geïnduceerde veranderingen in de geoëlektrische eigenschappen van de ondergrond.					
opmerkingen:					
trefwoorden: Lekdetectie, waterremmende constructie		verspreiding:			
opgeslagen op: onder titel: N:\projecten.gd\710000\710104\fow\Rapport\710104.0002 rapport v1.doc				aantal blz.: 57	
versie:	datum:	opgesteld door:	paraaf:	gecontroleerd door:	paraaf:
1	mei 2000	ing. J.W.M. Lambert		dr. J.K. van Deen	

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	1
2	Probleemstelling	3
3	Aanpak van het onderzoek	5
4	Waterremmende constructies	7
4.1	Waterremmende constructies	7
4.1.1	Damwanden	7
4.1.2	Cement-bentonietwanden	10
4.1.3	Diepwanden	11
4.1.4	Groutwanden	12
4.1.5	Chemische injecties	13
4.1.6	Vriestechnieken	14
4.1.7	Geomembranen	14
4.1.8	Natuurlijke formaties	16
4.2	Schattingen van lekdebieten	17
4.2.1	Lekkage door een verticale wand	17
4.2.2	Lek door een horizontale scheidende laag	19
4.3	Conclusies	20
5	Lekdetectie methoden	23
5.1	Inleiding	23
5.2	Gebruik van tracers	24
5.3	Preventieve detectie	24
5.4	Detectiemethoden	25
5.4.1	Detectie op basis van stromingsverschillen	25
5.4.1.1	Geoëlektrische methode	25
5.4.1.2	ECR en EFT	26
5.4.1.3	Gasinjectie	27
5.4.1.4	Stijghoogte metingen	28
5.4.1.5	Stroomsnelheid en stroomrichtingsmetingen	28
5.4.1.6	Camerasonde	29
5.4.2	Detectie op thermische eigenschappen van het lek	29
5.4.2.1	Thermische sensor	29
5.4.2.2	Glasvezel	29
5.4.3	Detectie op basis van akoestische eigenschappen	30
5.4.3.1	Akoestische emissie en seismische tomografie	30
5.4.4	Detectie op basis van chemische verschillen	30
5.4.4.1	Electrisch detecteren met behulp van een tracer	31

5.4.5	Detectie op basis van geometrische eigenschappen	31
5.4.5.1	Grondradar	31
5.4.6	Detectie op basis van mechanische eigenschappen	32
5.4.6.1	Slotverklikker	32
5.4.6.2	Betontester (Hamertje tik)	33
5.4.6.3	Sonderen (bijvoorbeeld met piezocone en/of dissipatietest)	33
6	Beoordeling methoden	35
6.1	Criteria	35
6.2	Tracers	37
6.3	Technieken	37
6.3.1	Preventieve technieken	37
6.3.2	Detectie op basis van stromingsverschillen	37
6.3.2.1	Geoëlektrische methoden	37
6.3.2.2	ECR en EFT	38
6.3.2.3	Gasinjectie	38
6.3.2.4	Stijghoogte metingen	38
6.3.2.5	Stroomsnelheid en stroomrichtingsmetingen	38
6.3.2.6	Visuele technieken	39
6.3.3	Detectie op thermische eigenschappen van het lek	39
6.3.3.1	Thermische sensor	39
6.3.3.2	Glasvezel	39
6.3.4	Detectie op basis van akoestische eigenschappen	39
6.3.4.1	Akoestische emissie en seismische tomografie	39
6.3.5	Detectie op basis van chemische verschillen	40
6.3.5.1	Elektrisch detecteren met behulp van een tracer	40
6.3.6	Detectie op basis van geometrische eigenschappen	40
6.3.6.1	Grondradar	40
6.3.6.2	Seismische metingen	40
6.3.7	Detectie op basis van mechanische eigenschappen	40
6.3.7.1	Slotverklikker	40
6.3.7.2	Betontester (hamertje tik)	40
6.3.7.3	Sonderingen	40
7	Conclusies en aanbevelingen	43
8	Referenties	46

BIJLAGEN

Bijlage 1 Beoordeling detectiemethoden ten behoeve van lekdetectie

1 Inleiding

Door Delft Cluster is bij brief DC-574-31-09 op 23 november 1999 aan GeoDelft opdracht verstrekt tot het uitvoeren van een studie 'Lekdetectie in waterremmende constructies', conform het door GeoDelft ingediende projectvoorstel 01.01.04 van 3 november 1999.

Het voorliggend onderzoek is inventariserend en richtinggevend met het oog op de volgende lange-termijndoelstelling:

Het ontwikkelen van een (gereedschapskist van) detectietechniek(en) voor het opsporen en lokaliseren van lekken in waterremmende constructies.

De korte-termijndoelstelling (de doelstelling van voorliggend onderzoek is):

Het identificeren van die techniek(en) voor lekdetectie in waterremmende voorzieningen die het meest kansrijk is (zijn) voor verdere ontwikkeling. De criteria voor 'meest kansrijk' zijn niet zonder meer beschikbaar en worden gaande dit project ontwikkeld.

In voorliggend rapport wordt verslag uitgebracht van de resultaten van deze studie.

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de probleemstelling, die aan het onderzoek ten grondslag ligt.

In hoofdstuk 3 wordt de werkwijze beschreven. In hoofdstuk 4 is beschreven welke waterremmende constructies in de civiele- en milieutechniek worden toegepast. Daarbij wordt onder meer ingegaan op de daarbij toegepaste materialen, voornamelijk in relatie tot meettechnieken, de mogelijke oorzaken en de mogelijke gevolgen van het disfunctioneren van de constructie. Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 een overzicht gegeven van beschikbare detectietechnieken. Hoofdstuk 6 geeft een beoordeling van de geïnventariseerde detectiemethoden. In hoofdstuk 7 worden conclusies getrokken en worden aanbevelingen voor het vervolgonderzoek gedaan.

2 Probleemstelling

Waterremmende constructies worden zowel in de civiele techniek als in de milieutechniek toegepast. In de civiele techniek gaat het om constructies die het waterbezwaar tijdens de bouw of in de gebruikstoestand moeten reduceren; in de milieutechniek om het afschermen van verontreinigde locaties. De waterremmende constructie heeft in het algemeen verticale en horizontale componenten, ieder met eigen ontwerp-, aanleg-, lekdetectie- en reparatieaspecten. Hoewel geen constructie in de eigenlijke zin van het woord, is ook de natuurlijke klei- of veenlaag die de onderafdichting moet leveren als ‘constructie’ opgevat en zodoende in deze studie meegenomen.

Het disfunctioneren van een waterremmende constructie heeft als gevolg:

- het optreden van een groter waterbezwaar dan voorzien met als mogelijke gevolgen:
- hogere bemalingkosten
- problemen met betrekking tot onttrekking- en lozingsvergunningen
- schade aan de omgeving, bv. door zettingen of piping
- het verdwijnen van verontreinigd grondwater uit de constructie, indien het onttrekkingsdebiet niet wordt opgevoerd.

In de huidige praktijk is het nauwkeurig detecteren van lekken tijdrovend en daardoor kostbaar. Kosten voor wachttijden bij een werk in uitvoering bedragen al gauw tienduizenden guldens per dag. Rigoureuze reparatiemethoden, zoals het jetgrouten van volledige ‘verdachte’ wanden kosten in de orde van NLG 1.000,-- tot NLG 1.500,-- per m³.

Door snel en nauwkeurig lekken te kunnen detecteren wordt zowel aan de kant van wachtkosten als aan de kant van reparatiekosten aanzienlijk bespaard.

In dit rapport worden de sterkten en zwakten van een groot aantal toegepaste en mogelijke detectietechnieken geanalyseerd, waarna op basis van een aantal objectieve criteria wordt afgewogen welke detectietechniek(en) het meest kansrijk zijn om verder te ontwikkelen.

Vooruitlopend op de analyse van detectiemethoden willen wij nadrukkelijk vermelden dat ook met betrekking tot lekkage in waterremmende constructies het voorkomen van lekkage altijd vele malen efficiënter is dan het genezen. Het verder ontwikkelen en toepassen van preventieve maatregelen, met name op risicovolle locaties is hiervan een belangrijk onderdeel. Daarnaast komt het ons voor dat in de praktijk opgemerkte afwijkingen vaak onvoldoende worden vastgelegd en/of leiden tot adequate maatregelen.

3 Aanpak van het onderzoek

Het voorliggend onderzoek bestaat uit de volgende onderdelen:

- Inventarisatie van waterremmende constructie met een beschrijving van de toegepaste materialen en per constructie de daarbij optredende faalmechanismen (hoofdstuk 4)
- Inventarisatie van toegepaste en mogelijk toepasbare lekdetectiemethoden (hoofdstuk 5)
- Vraaggesprekken met externe deskundigen (ir. B.J. Admiraal, Volker Wessels Stevin en dr. J. Meekes, TNO-NITG) . De resultaten van deze gesprekken zijn verwerkt in hoofdstuk 5
- Het opstellen van criteria voor de beoordeling van methoden (paragraaf 6.1)
- Het afwegen van de verschillende methoden aan de hand van objectieve criteria (paragraaf 6.2 en Tabel 2)
- Het opstellen van conclusies en het doen van aanbevelingen teneinde de lange termijn doelstelling te bereiken, alsmede een globaal plan voor de verdere aanpak.

4 Waterremmende constructies

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van waterremmende constructies, zoals die in de civiele en in de milieugeotechniek worden toegepast. Het betreft hier zowel de toepassing van verticale als van (min of meer) horizontale voorzieningen. Per constructie wordt ingegaan op de toegepaste materialen, voornamelijk in relatie tot toe te passen meettechnieken, op de wijze van aanleg, eventuele – bij aanleg – te treffen voorzieningen en voorzorgsmaatregelen. In voorkomende gevallen wordt kort ingegaan op een voorbeeld van een disfunctionerende constructie, waarbij globaal de effecten en kosten van het disfunctioneren worden aangegeven.

In een aparte paragraaf (4.3) wordt ingegaan op de eisen die aan een detectiesysteem gesteld moeten worden om calamiteiten als gevolg van het disfunctioneren te voorkomen.

4.1 Waterremmende constructies

De volgende waterremmende constructies worden hier behandeld:

- damwanden (4.1.1)
- diepwanden (4.1.2)
- cement-bentonietwanden (4.1.3)
- groutwanden (4.1.4)
- chemische injecties (4.1.5)
- vriesconstructies (4.1.6)
- geomembranen (4.1.7)
- natuurlijke formaties (4.1.8).

4.1.1 Damwanden

Damwanden zijn vervaardigd van hout, beton of staal [ref. 10]. Waar een goede waterremmende werking noodzakelijk is, wordt veelal gebruik gemaakt van stalen damwanden. In deze paragraaf wordt dan ook ingegaan op de damwand, opgebouwd uit stalen damwandelementen.

Damwanden zijn op zichzelf staande, verticale elementen die onderling zijn gekoppeld door middel van een slotconstructie over de gehele lengte van de damwand. Stalen damwanden kunnen bestaan uit Z-, U- of H-vormige profielen met een dikte variërend van 6 tot 31 mm en lengten tot 31 m.

Damwandplanken worden afzonderlijk of met meerdere tegelijk in de grond aangebracht door middel van trillen, heien of drukken, zonodig in combinatie met spuiten, fluïdiseren of voorboren.

Voor diepere en zwaardere constructies worden wel combiwanden, PSP-wanden of HZ-wanden toegepast. Bij deze wanden worden de damwandprofielen afgewisseld met bv. buisprofielen of I-profielen.

Risicofactoren

Met betrekking tot de grondwaterstroming zijn met name de verbindingen tussen de opbouwende elementen van de damwand van belang: de damwandsloten. Damwandsloten zijn per definitie niet waterdicht. In de praktijk blijkt het echter mogelijk te zijn om gesloten damwandkuipen te construeren met een minimale slotlekkage. Praktijkproeven, uitgevoerd door Arbed [ref. 4] tonen aan dat bij een correct geheide damwand de slotlekkage inderdaad minimaal is. Met behulp van de door Sellmeijer afgeleide formule voor stroming door damwandsloten kan worden afgeleid dat de 'reciproke weerstand' van een damwandslot in de orde van 10^{-7} d/m bedraagt. Door het injecteren van bv. bitumineuze slotvullingen kan de weerstand met een factor 10 tot 100 worden vergroot. Hiermee wordt dan een nagenoeg volkomen dichte wand bereikt. Evaluatie van het waterbezwaar in een recente grote bouwput heeft aangetoond dat de genoemde weerstandswaarden daadwerkelijk praktisch haalbaar zijn.

Desondanks wordt herhaaldelijk geconstateerd dat het waterbezwaar binnen een damwandkuip vele malen hoger is dan vooraf was berekend. Redenen daarvoor zijn:

- de damwand is, geheel of plaatselijk niet tot voldoende diepte geheid en sluit daardoor onvoldoende aan op de horizontale afdichtende laag. Dit kan liggen aan obstakels in de ondergrond, aan onvoldoende bekendheid met de diepteligging van de waterremmende laag, waarop de damwand moet aansluiten of door andere uitvoeringsfouten
- de damwand is 'uit het slot gelopen'. Normaal gesproken wordt de damwand geleid door het slot van de voorgaande damwandplank. Door obstakels, kromme planken, gebruik van planken met afwijkende sloten of anderszins kan het voorkomen dat de damwanden op bepaalde locaties niet goed op elkaar aansluiten. Er ontstaat een spleet tussen twee opeenvolgende damwandplanken. Naarmate de damwanden langer zijn, wordt de afstand tussen twee opeenvolgende planken in het algemeen groter
- damwandplanken worden, na het voltooiën van de damwandkuip, (bv. na ontgraving of onder invloed van extreme belastingen) nog uit elkaar worden gedrukt. Bv. als gevolg van te hoge uitwendige belastingen
- corrosie in de bedrijfsfase bv. door agressieve componenten in bodem of grondwater. Dit probleem kan met name optreden bij permanente damwanden
- de horizontale afsluitende laag (bv. de aansluitende natuurlijke klei/veenlaag) vertoont lekkages.

Preventieve maatregelen

Preventieve maatregelen om ongewenste damwandlekkage te voorkomen zijn:

- controle op de kwaliteit van de in te brengen damwanden

Indien er eisen worden gesteld aan de waterdichtheid van de damwandkuip dient vooraf te worden gecontroleerd op de kwaliteit en de vorm van de in te brengen damwandelementen. Hergebruikte planken kunnen krom, vuil of geroest zijn. Alle sloten in één constructie dienen van hetzelfde type te zijn.

Stringente keuring vooraf, conform de (concept) Europese Richtlijnen moet worden uitgevoerd.

- Zorgvuldigheid tijdens het inbrengen van de damwanden

Het uit het slot lopen van damwanden wordt onder meer veroorzaakt doordat – als gevolg van de ongelijke wrijving tussen de slotzijde en de vrije zijde van de plank – de kracht die op de bovenzijde van de plank wordt uitgeoefend excentrisch verdeeld wordt.

Het gebruik van een stijve en zware gekoppelde heigording, voorzien van middelen om de planken goed haaks en plaatsvast op te sluiten, is daarbij een goed hulpmiddel.

Het aanbrengen van hulpmiddelen om de planken bij te sturen heeft in veel gevallen een averechts effect.

Vaak wordt door de walserijen aanbevolen om gestaffeld te heien. Dit betekent dat vooraf een aantal planken in elkaars slot worden gezet en om beurten 2 – 3 meter worden ingeheid of -getrild.

Bij combiwanden bestaan de damwand per definitie uit ongelijkvormige elementen. De buizen zijn de primaire elementen en worden eerst ingebracht. Vervolgens worden de secundaire elementen tussen de primaire elementen ingebracht. Geringe maatafwijkingen in de primaire elementen leiden al tot problemen bij het inbrengen van de secundaire elementen.

In het algemeen wordt het uit het slot lopen van een damwandplank niet opgemerkt gedurende de werkzaamheden.

- Damwandslotverklikker

Zoals hiervoor is opgemerkt, wordt aan maaiveld in het algemeen niet opgemerkt dat damwanden uit het slot lopen. Om dit gemis op te vangen is de slotverklikker ontwikkeld. De meest gebruikte methode is de damwandslotverklikker met breekpen. Het meetsysteem wordt gevormd door een gesloten elektrisch circuit dat onder in het slot van een damwandplank wordt aangebracht. Wordt bij het inbrengen van een plank geconstateerd dat de breekpen afbreekt, dan is daarmee nagenoeg met zekerheid bepaald dat de plank in het slot is aangebracht. Bij dit systeem moet een elektrische bedrading naar de voet van elke damwandplank worden aangebracht.

- Invloed heimethode

Het intrillen in plaats van heien van damwanden leidt in het algemeen tot minder risico voor het uit het slot lopen van damwandelementen.

- Verkenning ondergrond

De kans dat onvoldoende aansluiting met de horizontale scheidende laag optreedt kan worden verkleind door het uitvoeren van voldoende bodemonderzoek voorafgaand aan de ontwerpfase.

Kennis van de geologische ontstaansgeschiedenis van de betreffende scheidende laag is hierbij van belang. Zo is bijvoorbeeld een bekend gegeven dat de (regionaal) slecht doorlatende laag van de Formatie van Kedichem plaatselijk zandig ontwikkeld is.

Specifieke eigenschappen

Verticale wand. Mogelijke lekken: onderling niet aansluitend, niet goed aansluitend op (horizontale) slechtdoorlatende laag (niet diep genoeg), kwetsbare aansluiting op bv. folie, onzekerheid of de lekkage optreedt in de (verticale) damwand en/of in de horizontale afscherming (w.o. natuurlijke klei/veenlaag). Materiaal: stalen damwanden onderscheiden zich van hun omgeving door een hoog elektrisch geleidend vermogen. Daardoor storend op geoëlektrische methoden.

Praktijkvoorbeelden

Phoenixgarage Delft: damwand is op diverse plaatsen uit het slot gelopen; dit is ook geconstateerd maar hierop is verder geen actie ondernomen. Locaties zijn ook niet geregistreerd. Grenzend aan monumentaal pand. Bij ontbreken detectiemethode gekozen voor volledig grouten van een wand. Kosten ca. NLG 1.000.000,--.

4.1.2 Cement-bentonietwanden

Cement-bentonietwanden zijn in de grond aangebrachte verticale schermen (panelen) met een geringe sterkte. Ze worden voornamelijk vanwege de waterremmende eigenschappen aangebracht. In het algemeen betekent dit dus dat aan de waterremmende kwaliteit van deze wanden hoge eisen worden gesteld.

Cement-bentonietwanden worden aangebracht als een vloeibare suspensie, die na verloop van tijd uithardt. De waterdichtheid wordt in voorkomende gevallen verbeterd door in de nog niet verharde suspensie een kunststoffolie aan te brengen.

Er zijn twee aanlegprincipes voor de panelen:

- met diepwandapparatuur wordt een sleuf gemaakt, die is gevuld met de cement-bentonietsuspensie, of met een bentonietvloeistof die in een later stadium door cement-bentoniet wordt vervangen.
- de wand wordt vervaardigd door een zwaar stalen I-profiel, waarop toevoerleidingen zijn bevestigd, in de grond te brengen. Onder gelijktijdig inpersen van cement-bentoniet wordt het profiel getrokken, waardoor een dun waterkerend scherm wordt gevormd. De I-profielen worden overlappend ingebracht. De flens van het in te brengen I-profiel volgt daarbij de sleuf, die door de flens van het voorgaande profiel is gevormd. Met deze methode kan maximaal een diepte van ca. 15 meter worden bereikt.

Bij beide methoden dienen twee opeenvolgende panelen elkaar enigszins te overlappen, zodat geen grondwaterstroming tussen twee panelen kan optreden

Risicofactoren

Oorzaken waarom een cement-bentonietwand niet voldoet aan de specificaties ten aanzien van de waterremmende functie kunnen zijn:

- onvoldoende aansluiting tussen de panelen onderling kan optreden als gevolg van onjuistheden in de maatvoering en doordat de verharding van het aangrenzende paneel te ver is gevorderd.
- ontmenging van het cement-bentonietmengsel

- onjuiste samenstelling van het cement-bentonietmengsel
- het ontstaan van insluitsels in de cement-bentonietwand, bijvoorbeeld door instabiliteit van de gegraven sleuf voor of tijdens het verhardingsproces
- vervorming van de wand na het verhardingsproces.

Preventieve maatregelen

Preventieve maatregelen bestaan voornamelijk uit een voortdurende controle van de maatvoering en het gehele arbeidsproces. Hiervan maakt ook het regelmatig uitvoeren van tests op de samenstelling en de eigenschappen van het cement-bentonietmengsel deel uit. Desondanks kunnen een aantal zaken niet goed worden waargenomen, bv. het optreden van instabiliteit van de sleuf tijdens het verhardingsproces.

Ondanks voortdurende controles komt het in de praktijk toch veelvuldig voor dat de vooraf gestelde specificaties niet worden gehaald. Eén reden daarvoor is onder meer dat de materiaaleigenschappen (met name de doorlatendheid) noodgedwongen onder andere condities worden getest dan die waaronder zij in het werk aanwezig zijn.

Cement-bentonietwanden worden wel in combinatie met een folie aangelegd, waarbij de waterremmende functie van de wand voornamelijk door het folie wordt bepaald.

Specifieke eigenschappen

Cement-bentonietwanden zijn vertikaal.

Zwakke punten zijn de onderlinge aansluitingen en de aansluiting op een horizontale slecht doorlatende laag.

Cement-bentoniet is een materiaal dat in een groot aantal opzichten (mechanisch, elektrisch, akoestisch, hydrologisch) moeilijk is te onderscheiden van bv. kleilagen.

Het is niet eenvoudig om onderscheid te maken tussen het disfunctioneren van de horizontale slecht doorlatende laag, dan wel van de verticale wand.

Praktijkvoorbeelden:

- Bouwdok Barendrecht.
- Griftpark te Utrecht
- 3e Merwedehaven te Dordrecht.

Deze drie objecten zijn alle omgeven door een cement-bentonietwand. In alle drie gevallen zijn lekkages opgetreden. Bij het Bouwdok Barendrecht is, door middel van een uitgebreide pompproef (duur enkele maanden), tenslotte de belangrijkste leklocatie geïdentificeerd. Hoofdrede was een niet correcte aansluiting tussen twee panelen onderling, waaromheen vervolgens een dummywand is geplaatst. Kosten orde honderdduizenden guldens. Daarnaast bleek een gedeelte van de 'lek' vanuit de diepere ondergrond afkomstig, wegens het plaatselijk ontbreken van de Formatie van Kedichem.

4.1.3 Diepwanden

Een diepwand is een door ontgraving in de grond vervaardigde, betonnen wand. Diepwanden zijn vrijwel altijd van gewapend beton. De dikte varieert van 0,40 m tot 1,20 m.

Voor de uitvoering worden in eerste instantie geleidingsbalken op maaiveldniveau aangebracht, waartussen een ondiepe sleuf wordt gegraven, over de lengte van de aan te brengen diepwand. Binnen de geleidebalken wordt in secties ontgraven, bijvoorbeeld door middel van een diepwandgrijper. De sleufwand wordt tijdens het graven gesteund door een steunvloeistof, in het algemeen wordt hiervoor bentoniet toegepast.

Na het op diepte komen van een sectie worden voegmallen en eventueel wapening geplaatst en wordt vanonder uit beton in de sleuf gebracht, waardoor de steunvloeistof wordt verdrongen.

Na het aanbrengen van een sectie is een dag verhardingstijd noodzakelijk. Pas nadat de aangrenzende panelen zijn verhard en de voegmallen zijn verwijderd, kan een tussenliggend paneel worden ontgraven.

Risicofactoren

Ter plaatse van de voegmallen ontstaat een naad tussen twee segmenten. Hierdoor kan grondwaterstroming optreden. Dit kan worden tegengegaan door tijdens het ontgraven voegstrippen te plaatsen.

Voor het overige kan disfunctioneren van de diepwand ontstaan door onjuiste maatvoering, onjuist storten van beton, bijvoorbeeld doordat ontmenging optreedt, als gevolg van insluitsels in de wand (bv. door instabiliteit van de sleuf voor of tijdens het verhardingsproces).

Preventieve maatregelen

Toepassing van voegstrippen om stroming door de stortnaden te voorkomen.

Controle van de maatvoering gedurende het gehele arbeidsproces is eveneens van belang.

Specifieke eigenschappen

Diepwanden zijn altijd vertikaal.

Enige lek door de voegen zal altijd optreden, zijnde inherent aan het plaatsingsproces

De wand is vervaardigd van (gewapend) beton.

Praktijkvoorbeelden

Specifieke voorbeelden van lekproblemen zijn ons niet bekend, wellicht omdat deze wanden veelal niet worden vervaardigd met het primaire doel om water te keren.

4.1.4 Groutwanden

Grout is een mengsel van cement, water en fijn zand. Door middel van groutinjecties kunnen zowel verticale (palenwanden), als horizontale schermen worden gemaakt. Ook tussenvormen zijn mogelijk, zoals bv. een boogvormige uitvoering, welke tegen grote drukken bestand is. Palenwanden kunnen verbuisd worden gemaakt door middel van schroefboren of avegaren of door middel van een injectiesysteem. Kenmerk van de wanden is, dat zij bestaan uit grote aantallen kolommen welke volgens een zodanig stramien worden geplaatst, dat een waterdichte afsluiting wordt gegarandeerd doordat elke kolom een aantal voorgangers overlapt.

Risicofactoren

Uitgaande van de toepassing van kolommen die met een injectiesysteem zijn geplaatst, kunnen de volgende risico's optreden:

- onzorgvuldige maatvoering, waardoor de kolommen elkaar niet altijd overlappen
- onvoldoende diameter van de kolommen of gedeelten daarvan, doordat insnoeringen optreden, bv. als gevolg van de bodemsamenstelling (bv. veen)
- onzorgvuldige uitvoering, door bv. scheefstand van de kolommen, onderbreking van het injectieproces.

Bij verbuisd aangebrachte kolommen kunnen insnoeringen ontstaan als gevolg van instabiliteit tijdens het verhardingsproces.

Preventieve maatregelen

De controle op het injectieplan moet de geometrie van het plan omvatten, controle op optredende grond- en waterdrukken bij verbuisde palen en beoordeling van de grondgesteldheid

Tijdens de uitvoering is de maatvoering en controle op de eventuele scheefstand van belang. Het is tevens van belang dat bij verbuisd aangebrachte palen de aan te houden condities als debiet, overdruk, toepassing van steunvloeistof e.d. worden gecontroleerd. Tevens is het van belang de samenstelling van de injectievloeistof te controleren. Eventuele afwijkingen dienen te worden gerapporteerd, evenals de maatregelen welke hieruit voortvloeien.

Specifieke materiaaleigenschappen

Groutwanden zijn veelal vertikaal, maar kunnen ook horizontaal worden aangelegd (bv. groutboog). Lekkage ontstaat voornamelijk door onvoldoende onderlinge aansluiting van de injecties onderling of onvoldoende aansluiting op de onderafdichting.

De wanden bestaan uit een verhard mengsel van cement en zand.

Praktijkvoorbeelden

Tramtunnel Den Haag. Vermoedelijk onvoldoende aansluiting tussen de groutkolommen, waardoor lekkage is ontstaan. Is naar voren gekomen tijdens het ontgraven tot op de groutboog en heeft geleid tot een zandmeevoerende wel en daardoor ontgroning tot buiten het werkterrein. Gevolgen: vertraging van meerdere jaren, aangepaste werkwijze en ca. 90 miljoen schade.

4.1.5 Chemische injecties

Chemische injecties kunnen worden uitgevoerd met behulp van een scala van injectiemiddelen, waarvan waterglas één van de bekendste is. Met chemische injecties worden in het algemeen bolvormige elementen vervaardigd welke na verharding een geringe doorlatendheid voor water hebben. Er kunnen meerdere lagen boven elkaar worden aangebracht.

Aangezien chemische injecties duur zijn, worden ze slechts sporadisch en dan in het algemeen slechts over geringe oppervlakten aangebracht. De lokalisering van eventuele lekkages speelt daardoor in het algemeen slechts een kleine rol.

4.1.6 Vriestechnieken

Vriestechnieken zijn in Nederland tot nu toe sporadisch toegepast. Er bestaan twee technieken, beide gebaseerd op het aanbrengen van dubbelwandige lansen:

- Pekelvriezen
- Stikstofvriezen.

Bij pekelvriezen wordt een water/zoutmengsel en bij stikstofvriezen vloeibare stikstof door de binnenbuis geperst. De retourstroom vindt plaats door de annulaire ruimte. Door warmteuitwisseling tussen de vloeistof in de annulaire ruimte en de formatie zal het grondmassief bevroren. Vriezen is alleen toepasbaar als tijdelijke constructie. Tijdens de levensduur is het noodzakelijk om (zij het met een verlaagd debiet) de vriesvloeistof te blijven rondpompen (onderhoudsvriezen).

Risicofactoren

Wanneer de onderlinge afstand tussen de vrieslansen te groot is, zal lekkage ontstaan. Dit kan echter eenvoudig worden opgelost door het debiet van de lansen te vergroten en/of door langer te vriezen. Bij pekelvriezen bestaat de mogelijkheid dat de injectielans breekt. In dat geval zal rondom deze lans een lek ontstaan. Naar verwachting zal het effect van een gebroken lans meetbaar zijn, omdat er geen of minder retourvloeistof terugkeert.

Preventieve maatregelen

Preventieve maatregelen kunnen bestaan uit het monitoren van het proces. In principe is lekdetectie niet noodzakelijk omdat in principe het verlengen van de vriesperiode of het vergroten van het debiet automatisch leidt tot het herstellen van lekken. Optimalisatie van de onderlinge afstand tussen de lansen in relatie tot tijdsduur en debiet kan leiden tot kostenbesparing.

Specifieke eigenschappen

Geschikt voor verticale wanden, maar ook voor scheefstaande wanden en theoretisch ook voor horizontale constructies. Door de flexibiliteit van de methode is de lekdetectie minder belangrijk. De samenstelling van de waterremmende constructie komt overeen met die van het omringende grondmassief, alleen is het massief plaatselijk in bevroren toestand; hierdoor wijten de mechanische en elektrische eigenschappen sterk af van de omgeving.

Praktijkvoorbeelden

Praktijkvoorbeelden van lekkende vriesconstructies zijn bij ons niet bekend.

4.1.7 Geomembranen

Geomembranen bestaan in het algemeen uit PVC-, LDDPE of HDPE- folies of aanverwante producten. In de civiele techniek worden in het algemeen folies met een dikte van 0,8 – 1,5 mm toegepast, in de milieutechniek (bv. afdichtingen van vuilstorten) worden vooral HDPE-folies toegepast met in het algemeen een grotere dikte.

Geomembranen kunnen in den natte of in den droge worden aangelegd. In den natte worden ze in een gebaggerd cunet afgezonden, in den droge wordt het folie in het cunet boven de – tijdelijk verlaagde – grondwaterstand neergelegd. In het algemeen wordt met behulp van een folie een waterdichte bakconstructie nagestreefd, bestaande uit een horizontaal gedeelte en uit taluds. In veel gevallen zijn

er verbindingconstructies met andere constructieve elementen in het folie opgenomen, zoals met damwanden, betonnen elementen, leidingen etc.

Er zijn beperkingen aan de oppervlakte foliemateriaal die in een keer kan worden aangevoerd. Deze worden meestal bepaald door het maximale gewicht. Daardoor is in-situ lassen van het materiaal vrijwel altijd noodzakelijk.

Risicofactoren

De risicofactoren met betrekking tot het falen van de waterdichtheid van de constructie zijn ontleend aan [ref.5]:

- de kwaliteit van lassen (met name de veldlassen) en de aansluitingen
- de kwaliteit van het gebruikte materiaal
- eventuele doorponsingen als gevolg van grind, stenen en scherpe materialen juist onder of boven het folie
- het opbarsten van de constructie
- het beschadigen van de folie tijdens de aanleg door te steile taluds, onoordeelkundig aanbrengen van de aanvulling en het verdichten daarvan.

Daarnaast kunnen in de gebruiksfase beschadigingen optreden, o.m. door chemische aantasting en veroudering.

Preventieve maatregelen

De kwaliteit van het gebruikte materiaal en de kwaliteit van de lassen moeten worden getoetst aan de daarvoor geldende richtlijnen en voorschriften, opgesteld door KIWA en TNO. Daarnaast zijn door de Bouwdienst van Rijkswaterstaat standaard-besteksbepalingen opgesteld waarin ook is opgenomen de frequentie waarmee materiaalmonsters moeten worden genomen en de standaarden volgens welke deze moeten worden getest.

Met name een toetsing van het ontwerp, controle van materiaal en lassen, het leveren en aanbrengen van de folie door gecertificeerde bedrijven, de controle op scherpe voorwerpen en oordeelkundige aanvulling en verdichting van het aanvulmateriaal zijn van belang.

Er bestaan folies, waarin een geprefabriceerd detectiesysteem is aangebracht door middel van geleidende draden.

Specifieke materiaaleigenschappen

Folies worden horizontaal en onder talud aangelegd.

Lekkage kan met name optreden ter plaatse van lassen of als gevolg van mechanische beschadiging. Geomembranen bestaan uit kunststof van een geringe dikte met de daarmee samenhangende specifieke eigenschappen, met name de geringe elektrische geleidendheid. Storende invloeden worden gevormd door sterk geleidende materialen, zoals bv. damwanden, leidingen etc. die in de nabijheid zijn gelegen of ook met de folie zijn verbonden.

Praktijkvoorbeelden

IJsselallee te Zwolle. Wellicht is hier sprake van materiaalfouten en uitvoeringsfouten. Met geoelektrisch onderzoek is een lek gedetecteerd. Overige lekken zijn niet gedetecteerd, wellicht omdat zij zich ter plaatse van de aanhechting met de damwand bevinden. Inmiddels bedraagt het waterbezwaar ordegrootte 80 m³/uur en zijn er nog geen oplossingen in uitvoering. Kosten tot nog toe meer dan 1 miljoen gulden.

4.1.8 Natuurlijke formaties

In de civiele en de milieutechniek kunnen ook de eigenschappen van slecht waterdoorlatende lagen worden benut. Hierbij valt te denken aan klei- en veenlagen. De waterremmende functie van natuurlijk gevormde gesteenten is in Nederlandse omstandigheden in het algemeen niet van belang. Natuurlijke slecht doorlatende lagen zijn in West-Nederland veelal horizontaal of nagenoeg horizontaal afgezet. Scheefgestelde lagen komen veelal voor in die gebieden die glaciale invloeden hebben gekend. In Limburg komen wel gesteenten voor en kunnen ook verticale barrières (geologische breuken) optreden.

Voor dit onderzoek beperken we ons tot de min of meer horizontaal afgezette klei- en veenlagen.

Risico's worden gevormd door de heterogeniteit van de bodem en door menselijke ingrepen. Inherent aan de wijze waarop in het verleden de bodemvorming heeft plaatsgevonden is het voorkomen van wisselende dikten in afzettingen en, bijvoorbeeld als gevolg van inundaties, het voorkomen van verspoelingen en afwisselingen in het diepteniveau. Als gevolg hiervan kunnen waterremmende lagen die bij het bodemonderzoek zijn aangetroffen plaatselijk onderbroken zijn en kunnen er bovendien verschillen in hoogteligging voorkomen.

Het (plaatselijk) ontbreken van klei/veenlagen kan leiden tot lek (kwel naar de bouwkuip of juist inzijging onder een vuilstort); variaties in dikte en samenstelling leiden tot variatie in weerstand van de laag.

Waar de hoogteligging van slechtdoorlatende lagen varieert kan dit er toe leiden dat vertikaal aangebrachte waterremmende constructies plaatselijk niet aansluiten op waterremmende lagen.

Tenslotte kunnen door menselijk ingrijpen plaatselijk perforaties zijn ontstaan, bv. door eerdere ontgravingen, heiwerk, zandpalen of doordat in het verleden de bodem is opgebarsten.

Preventieve maatregelen

Uiteraard kunnen geen preventieve maatregelen worden getroffen om te voorkomen dat inhomogeniteiten optreden. Wel kan het risico dat deze inhomogeniteiten zullen leiden tot schade worden verminderd door het inzetten van geologische kennis en adequaat bodemonderzoek. Tenslotte kan archiefonderzoek er in bepaalde gevallen toe bijdragen dat onaangename verrassingen worden voorkomen.

Specifieke materiaaleigenschappen

Geologische formaties in Nederland hebben in het algemeen een min of meer horizontale oriëntatie. Lekken in afdichtende veenlagen kunnen voorkomen als gevolg van natuurlijke discontinuïteiten als gevolg van het afzettingsproces of door menselijk handelen.

De als waterremmend beschouwde lagen bestaan in Nederland voornamelijk uit klei en/of veenlagen. Deze lagen hebben in de regel een beter elektrisch geleidend vermogen dan (goed doorlatende) zand- en grindlagen.

Praktijkvoorbeelden

Nieuwbouw Hoofdkantoor ABN-AMRO; bemaling gedimensioneerd op aanwezigheid van een doorlopende kleilaag. Achteraf gezien bleken er echter grote gaten in de kleilaag aanwezig te zijn, deze zijn opgespoord door middel van aanvullende boringen en sonderingen. Resultaat: aanpassing van de bouwwijze, kosten meer dan 1 miljoen.

Bouwdok Barendrecht; naast een lek in de cement-bentonietwand zelf (zie de desbetreffende paragraaf), was hier ook sprake van een onderbreking in de afsluitende kleilaag (Formatie van Kedichem). Door middel van extra sonderingen is de omvang van dit gat afgebakend en is, met behulp van een risicoanalyse het ontwerp van de cement-bentonietwand enigszins aangepast.

4.2 Schattingen van lekdebieten

In deze paragraaf worden – als voorbeeld – enkele berekeningen gepresenteerd, welke een indruk geven van de omvang van een lekdebiet door een waterremmende constructie. Deze voorbeelden dienen onder meer voor een nadere onderbouwing van de randvoorwaarden waaraan te ontwikkelen detectietechnieken moeten voldoen. Beschouwd worden zowel horizontale als verticale waterremmende constructies. Voor een berekening van lekdebieten in een folie wordt verwezen naar het handboek folietechnieken.

4.2.1 Lekkage door een verticale wand

Hierbij zijn twee verschillende situaties beschouwd:

- lekkage door damwandsloten (a)
- lekkage door een homogene wand met een zekere hydraulische weerstand (b).

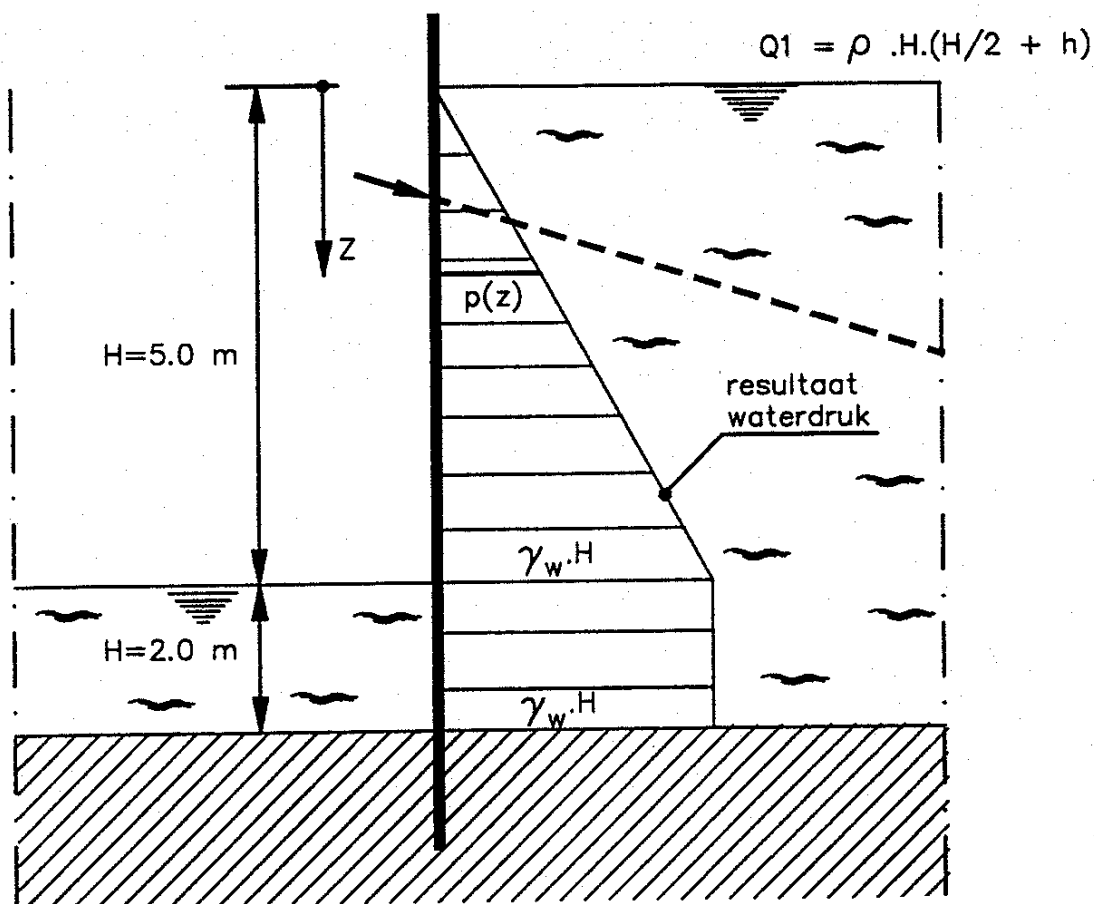
Lekkage door (damwand) sloten

De lekkage door damwandsloten is beschreven door Sellmeijer et al [ref. 4] en kan worden berekend met de formule:

$$Q = \rho * H * (H/2 + h)$$

waarin:

- Q = volume dat door de damwand stroomt [m^3/dag]
- ρ = de inverse slotweerstand [m/d]; de waarde voor de slotweerstand is voor een aantal uitvoeringswijzen experimenteel bepaald
- H = verschil in grondwaterstand aan weerszijden van de damwand [m]
- h = afstand van de grondwaterspiegel binnen de bouwkuip tot de top van de slecht waterdoorlatende laag [m].



Figuur 3.1 Lekkage door een damwand

Bij damwandsloten zonder slotvulling worden p -waarden in de orde van 10^{-7} (m/s) aangehouden. Door het toepassen van (bijvoorbeeld bitumineuze) slotvullingen, kan de inverse slotweerstand afnemen (dus de weerstand neemt toe) met een factor in de orde 100.

Omgerekend naar lekdebieten betekent dit dat per meter slotlengte, een lekdebiet in de orde van enkele liters per dag optreedt. Voor een damwandlengte van bijvoorbeeld 20 m, kan dit neerkomen op ca. $0,1 \text{ m}^3/\text{slot}/\text{dag}$.

Bij het uit het slot lopen van een damwand of bij onvolledige aansluiting van een damwand op een weerstandbiedende laag kan – afhankelijk van de omvang van het lek en de doorlatendheid van de laag waarin het lek zich bevindt – het extra lek oplopen tot in de orde van tientallen m^3/dag .

Lekkage door een homogene wand

Bij lekkage door een overigens homogene wand (zoals bv. een cement-bentonietwand), kan de wandlek door de homogene wand nagenoeg analoog aan die van de damwand worden berekend met:

$$Q = c \cdot H \cdot (H/2 + h)$$

waarin:

Q = volume dat door de damwand stroomt [m^3/dag]

c = de hydraulische weerstand van de wand [d]. De hydraulische weerstand van de wand kan worden bepaald uit: $c = D/k$

waarin:

D = wanddikte [m]

k = doorlatendheid van de wand [m/d]

H = verschil in grondwaterstand aan weerszijden van de damwand [m]

h = afstand van de grondwaterspiegel binnen de bouwkuip tot de top van de slecht waterdoorlatende laag [m].

Voor cement-bentonietwanden bedraagt de hydraulische weerstand van de wand in de orde van honderden dagen. Bij een cement-bentonietwand volgens het schema zoals weergegeven in figuur 3.1. en een aangenomen c -waarde van 500 dagen bedraagt de lek per 100 m^1 wand: circa $5,5 \text{ m}^3/\text{dag}$. Een gat in de wand (aanne: oppervlakte van 1 m^2 , wanddikte van $0,5 \text{ m}$ gat gevuld met bodemmateriaal met een k -waarde = 10 m/d) leidt tot een debiet van $100 \text{ m}^3/\text{dag}$. Het 20-voudige dus van het debiet door de rest van de wand.

4.2.2 Lek door een horizontale scheidende laag

Het kan hier bijvoorbeeld gaan om een lek door een folie of een van nature aanwezige scheidende laag. Ook kan het de lekkage betreffen door een door middel van injecties (grout, chemische injecties) aangebrachte laag.

Voor het berekenen van het debiet door een cirkelvormige perforatie is de volgende formule afgeleid:

De afgeleide formule luidt:

$$Q = 2 \pi r_0 ((r_1/(r_1 - r_0)) * k * (\Phi_1 - \Phi_0))$$

waarin:

Q = lekdebet [m^3/d]

r_0 = straal van de cirkelvormige perforatie [m]

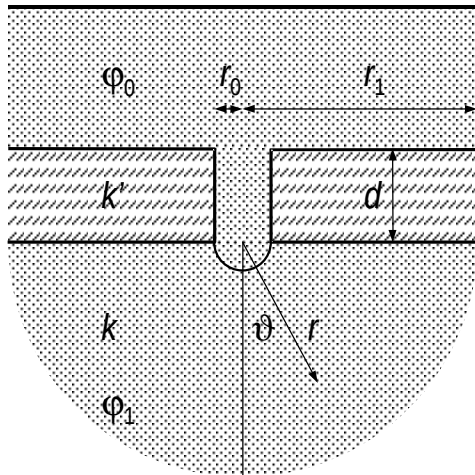
r_1 = invloedsafstand van de perforatie [m]

k = doorlatendheidscoëfficiënt van het materiaal waarmee de perforatie wordt opgevuld [m/d]

$\Phi_1 - \Phi_0$ = potentiaalverschil tussen eerste watervoerende laag en freatisch vlak [m].

Bij toepassing van de formule voor een enkele perforatie kan de verhouding $r_1/(r_1 - r_0) = 1$ worden gesteld.

Er wordt van uitgegaan dat spleten, gaten etc. niet 'open' staan, doch zijn gevuld door bodemmateriaal; dit zal een mengeling zijn van zand, klei en slib. Arbitrair is voor de doorlatendheid van dit materiaal uitgegaan van een k -waarde van 10 m/dag.



Figuur 3.2 Strooming naar een cirkelvormig gat in een kleilaag

Bij een stijghoogteverschil van 5 m over de kleilaag wordt het debiet van een gat met een straal van 0,5 m ongeveer: 157 m³/dag.

Ter vergelijking: een kleilaag van $c = 100$ d, $A = 1000$ m² en hetzelfde potentiaalverschil:

$$Q = 50 \text{ m}^3/\text{dag}.$$

4.3 Conclusies

Uit de voorgaande beschouwingen blijkt dat het debiet door een lek sterk afhankelijk is van de geometrie, de bodemopbouw en het te bereiken potentiaalverschil binnen en buiten de constructie.

Een lek is in het algemeen alleen dan relevant, wanneer het lekdebiet leidt tot schade.

Deze schade kan bijvoorbeeld bestaan uit:

- zettingen in de omgeving bijvoorbeeld aan gebouwen, leidingen, infrastructuur
- verspreiding van verontreiniging
- ontgrondingen (piping).

Ook kan bijvoorbeeld het overschrijden van het debiet waarvoor een vergunning moet worden aangevraagd als relevant worden beschouwd. De hoeveelheid grondwater die – zonder vergunning – vrij kan worden onttrokken bedraagt in veel provincies 12000 m³/jaar voor permanente onttrekkingen.

In het gegeven voorbeeld van een cement – betonierscherm (4.2.1) leidt een lek met een oppervlakte van 1 m² zodoende reeds ruimschoots tot vergunningplicht, hetzelfde geldt voor een perforatie van 1 m² in de scheidende laag zoals beschreven (4.2.2).

In algemeen zullen echter de effecten op de omgeving van dergelijke lekkages gering zijn.

Uit de voorgaande beschouwingen is daarom enigszins arbitrair geconcludeerd, dat de ontwikkelende methode in ieder geval in staat moet zijn om lekken met een oppervlakte van 1 m^2 op te sporen. een betere resolutie is evenveel gewenst.

De nauwkeurigheid waarmee de positie van het lek bepaald moet kunnen worden wordt - gezien de reparatiekosten – op tenminste 10 m vereist. Uiteraard zal ook hier een betere nauwkeurigheid worden nagestreefd.

5 Lekdetectie methoden

5.1 Inleiding

Om de locatie van een lek te kunnen opsporen moet aan de detectiemethode zekere nauwkeurigheidseisen voldoen. Deze hangen bijvoorbeeld sterk af van de risico's voor de constructie en voor de omgeving.

Om een lek te dichten zijn goede (maar relatief dure) oplossingen beschikbaar. Nagedacht wordt over zogenaamde extensieve herstelmethoden, waarbij gebruik gemaakt wordt van de stroming van het grondwater door het lek heen. Deze methoden kunnen een goedkoop alternatief zijn voor het gecombineerd detecteren en herstellen van een lek. Bovendien kan de lekdetectie globaler plaatsvinden of zelfs geheel achterwege blijven. Indien de positie van het lek onvoldoende nauwkeurig bekend is kan een extensieve herstel methode de oplossing zijn.

In dit hoofdstuk wordt een inventarisatie gemaakt van bestaande en potentiële detectiemethoden. Een aantal van deze methoden zal direct, of na een aanvullend ontwikkeltraject, inzetbaar zijn voor specifieke lekdetectie problemen. Daarnaast zal een aantal van de geïnventariseerde methoden in de praktijk niet of nauwelijks inzetbaar blijken te zijn.

Methoden om lekken in constructies op te sporen zijn zeer uiteenlopend van aard. Een eenduidige indeling waarbij een goed inzicht verkregen wordt in de mogelijkheden van de diverse methoden is derhalve gewenst. Om een zo praktisch mogelijk insteek te realiseren is er gekozen om vanuit de eigenschappen het lek te kijken en daar de detectiemethoden op in te delen. Hoe reageert de omgeving op een constructie met en zonder lek, ofwel wat zijn specifieke eigenschappen die een lek onderscheiden van zijn omgeving.

Voor het karakteriseren van een lek zijn zes maatgevende eigenschappen opgesteld:

- stromingsverschillen
- thermische verschillen
- akoestische verschillen
- chemische verschillen
- geometrische eigenschappen
- mechanische eigenschappen.

Voor elk van de bovenstaande categorieën zijn één of meerdere detectiemethoden te specificeren die, bij een juiste toepassing, het lek kunnen onderscheiden van zijn omgeving.

In tabel 1 staan de specifieke eigenschappen over een lek versus de detectiemethoden die op deze eigenschap kunnen triggeren.

In bijlage 1 wordt een eendoordeel gegeven over de in dit hoofdstuk te bespreken lekdetectiemethoden.

	stroming	thermisch	akoestisch	chemisch	geometrisch	mechanisch
Geo-elektrisch	ja					
ECR-EFT	ja					
Gasinjectie	ja					
Stijghoogte	ja					
Stromingmeter	ja					
Camerasonde	ja					
Temperatuur sensor		ja				
Glasvezel		ja				
Akoestische emissie			ja			
Elektrisch met tracer				ja		
Grondradar					ja	
Seismiek					ja	
Slotverklikker						ja
Betontester						ja

Tabel 1 Detectiemethoden op basis van specifieke eigenschappen van een lek.

5.2 Gebruik van tracers

Om de ondergrond transparanter te kunnen maken voor detectie of een onderscheid tussen stilstaand en stromend water aan te kunnen tonen is het ook mogelijk om gebruik te maken van zogenaamde tracers. Door een tracer af te stemmen op een detectiemethode is het mogelijk de desbetreffende detectiemethode uit te voeren dan wel de resolutie van de methode te verhogen. Door het verhogen dan wel verlagen van de grondwaterstand in een bouwkuip kan de gewenste stromingsrichting op gang worden gebracht. Door het detecteren van de tracer geeft het lek zich bloot. In de volgende paragrafen zal de tracer als zodanig enkele malen naar voren komen. Gedacht moet worden aan bijvoorbeeld het kleuren of het elektrisch geleidend maken van de grondwaterstroming. Bij het kleuren van de grondwaterstroming moeten in het algemeen monsterpunten (filters) worden ingericht; door de grondwaterstroming elektrisch te ‘labelen’ kan worden volstaan met oppervlaktetechnieken.

5.3 Preventieve detectie

Hoewel deze vorm van lekdetectie enigszins buiten het kader van dit onderzoek valt, is het toch belangrijk hierover enige opmerkingen te maken. Het voorkómen van lekkage is altijd beter dan het genezen. Met het oog hierop pleiten wij ervoor om die constructies die geheel of gedeeltelijk zodanige risico” met zich meebrengen dat lekkages niet acceptabel zijn, reeds tijdens de uitvoering voldoende controle op de kwaliteit van de constructie uit te voeren.

Het komt ons voor dat in de praktijk de daartoe voorhanden zijnde middelen niet altijd voldoende worden aangewend. Daarnaast hebben wij de stellige indruk dat met relatief geringe inspanningen preventieve detectiemethoden verder ontwikkeld kunnen worden.

Voorbeelden van toepasbare detectietechnieken zijn de slotenverklikker en de geleidende draden in de folieconstructies. Ontwikkelingen zouden kunnen liggen in de toepassing van glasvezeltechnieken.

Indien preventieve technieken worden toegepast is het van bijzonder belang om de meetgegevens goed en eenduidig vast te leggen.

5.4 Detectiemethoden

5.4.1 Detectie op basis van stromingsverschillen

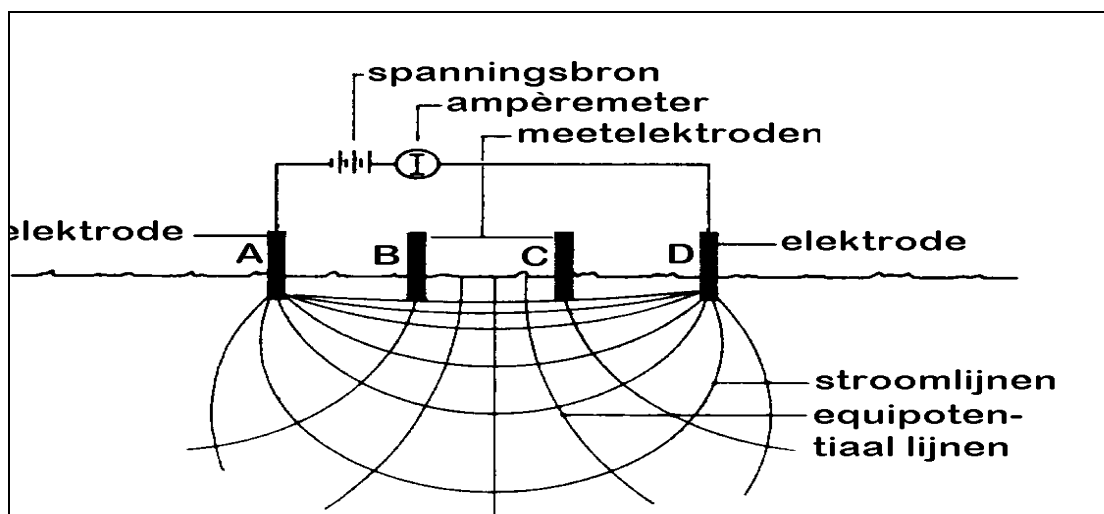
5.4.1.1 Geoëlektrische methode

Geoëlektrische metingen geven informatie over de elektrische weerstand van de ondergrond.

De weerstand is indicatief voor de grondslag (zand heeft een hoge, klei en veen een lagere weerstand). In de praktijk worden de meetgegevens vooral gebruikt voor de vaststelling van de laterale uitbreiding en de begrenzingen van structuren zoals zandgeulen in een kleipakket. Ook kan bijvoorbeeld de verspreiding van zout of verontreinigd grondwater geoëlektrisch worden gemeten.

Geoëlektrische metingen lenen zich echter ook voor het detecteren van lekken in waterkerende constructies zoals scheuren in kunststoffolies. De isolerende eigenschap van de folie en van andere niet-elektrisch geleidende waterkerende constructies wordt gebruikt om een lek te onderscheiden van zijn omgeving. Voor het detecteren van lekkages is het basisprincipe van de geoëlektrische methode in veel gevallen geschikt. De elektrische weerstand van de ondergrond wordt bepaald door via twee elektroden een stroom de grond in te sturen en met twee potentiaalelektroden het spanningsverschil te meten. Het basisprincipe van de geoëlektrische methode is weergegeven in figuur 1. De resolutie van geoëlektrische metingen kan verhoogd worden door de onderlinge elektrodeafstand te verkleinen.

Door aan weerszijden van de waterkerende constructie een elektrode te plaatsen komt bij het voorkomen van een lek, een elektrische verbinding tot stand. De positie van het lek is dan nog niet vastgesteld. Dit kan door meerdere elektroden te plaatsen en het elektrische potentiaalveld in kaart te brengen. Ter plaatse van het lek zal het potentiaalveld afwijken. De afmetingen van het lek (de lekstroom) bepalen mede de sterkte van het meetbare elektrische potentiaalverschil.



Figuur 1

Uit praktijktoepassingen van de geoëlektrische methode is gebleken dat het een beproefde techniek is om op een kosteneffectieve wijze lekkages op te sporen. NITG-TNO heeft een systeem ontwikkeld waarmee goede resultaten zijn geboekt [lit.12]. Hierbij wordt buiten de waterkerende constructie een elektrode geplaatst, terwijl binnenin meerdere elektroden staan opgesteld.

Een beperking van deze methode is dat een waterkerende wand niet van een geleidend materiaal mag zijn (bv stalen damwand) dan wordt de stroompreferent juist via de damwand geleid en werkt de techniek niet. Een uitbreiding van deze methode met behulp van chemische toevoegingen wordt besproken bij de detectie op basis van chemische verschillen.

5.4.1.2 ECR en EFT

De methode Electro Chemical Respons (ECR) is gebaseerd op het meten van locale veranderingen van de chemische samenstelling van de ondergrond. Grondwaterstromen veroorzaken een versterkt H^+ ionen transport in het natuurlijke elektrische veld van de bodem. Dit ionentransport kan worden geregistreerd met behulp van zeer gevoelige sensoren die tot in nanovolt nauwkeurig kunnen meten.

In de uitvoering van de metingen wordt een grid van sensoren aan het maaiveld geplaatst. Afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid en de grootte van het meetgebied tot maximaal 4000 sensoren. Deze sensoren registreren gelijktijdig de kleine elektrische spanningen in de ondergrond. De gegevens worden doorgestuurd naar een centrale computer waar direct een analyse van de verdeling van de H^+ ionenconcentratie in de ondergrond plaats vindt. Een groot voordeel van deze methode is de snelle uitvoering en verwerking van de meetgegevens. Ook is het ruimtebeslag van de opnemer relatief klein.

De metingen omvatten in het algemeen een nulmeting en vervolgmetingen. Er wordt een nulmeting uitgevoerd bij een stabiele grondwaterstand binnen en buiten de bouwkuip waarbij geen watertransport door het lek plaatsvindt. De vervolgmetingen worden uitgevoerd tijdens grondwaterstroming door het lek heen. Deze grondwaterstroming wordt opgewekt door het

kunstmatig aanbrengen van een stijghoogte verschil binnen en buiten de bouwkuip. Uit de analyse van de nulmeting en de vervolgmetingen kan een locatie van een lek worden verkregen.

Ondanks de gevoeligheid van de sensoren kan het voorkomen dat de lekwaterstroom te klein is om het verschil in H^+ -ionentransport goed te kunnen onderscheiden van zijn omgeving. Het is veelal niet wenselijk en mogelijk om het grondwatertransport te vergroten en ook zijn er grenzen aan de gevoeligheid van de sensoren. Derhalve zal het niveau(verschil) van de H^+ -ionenconcentratie verhoogd moeten worden. Hiertoe is een techniek ontwikkeld die door middel van het geven van een stroomstoot in de ondergrond extra ionentransport opwekt. Deze methode, Electric Flux Tracking (EFT) genaamd, is een aanvulling op de ECR methode en zorgt ervoor dat de ECR methode breder inzet baar is.

De methode is ontwikkeld door Texplor exploration & Environmental technology GmbH. Deze firma heeft in Duitsland ervaring opgedaan met deze methode, onder ander in enkele bouwkuipen te Berlijn [lit.13]. In Nederland is deze methode nog niet toegepast.

5.4.1.3 Gasinjectie

Deze methode is gebaseerd op een systeem dat gas op geringe diepte onder een hoek in de grond injecteert. Het gas zou in de grond penetreren en “reflecteren” aan laagovergangen, waarbij een deel van het gas naar het maaiveld terugkomt en een deel in de grond verder penetreert. Indien zich een lek in een wandconstructie bevindt zal het gas aan beide zijden van de constructie omhoog komen, zo is de gedachte.

Deze methode van gasinjectie werd oorspronkelijk toegepast bij het in kaart brengen van breuken in gesteenten. Omdat het bij breuken om herkenbare transportkanalen voor het gas gaat is de methode hier goed toepasbaar. Echter, bij een ondergrond waar geen sprake is van scheurvorming is het lastiger om op een gecontroleerde wijze gas vanaf het maaiveld op de gewenste diepte tot 10 à 20 meter te brengen.

De gedachte dat het gas bij de waterkerende wanden niet alleen voor de wand, maar ook via het lek aan de andere kant van de wand naar het maaiveld komt en daar dus gedetecteerd kan worden is moeilijk voorstelbaar. Om het in de praktijk te toetsen is in 1997/98 een proefproject in Nederland uitgevoerd. Het systeem wordt in Duitsland toegepast door het bedrijf Consult für Geo-und Bauwerktechnik te Tübingen.

De proeven zijn uitgevoerd bij een wandconstructie te Etten-Leur en bij een cement-betonietwand te Barendrecht en met twee verschillende gassen: CO_2 en helium. Bij de proeven waarbij CO_2 onder een hoek de grond in werd geïnjecteerd, bleek het meten van CO_2 tegen een fluctuerende achtergrondconcentratie niet goed mogelijk. Bij de proef met helium was er geen storende achtergrondconcentratie van helium, maar werd er geen substantiële verandering van de heliumconcentratie aan het maaiveld gemeten.

Praktijktesten hebben vaak als voordeel dat een werkelijke situatie kan worden nagebootst, maar als nadeel dat niet alle parameters in de hand gehouden kunnen worden. De resultaten zijn dus niet altijd even betrouwbaar. De resultaten van deze gasinjectieproeven, beschreven in rapporten van Grondmechanica Delft [lit.2], geven echter aan dat deze methode voor het detecteren van lekken in damwanden niet erg betrouwbaar is. Het injecteren en detecteren van gas boven de grondwaterspiegel is wellicht wel mogelijk, maar aantonen dat gas door de grondwaterspiegel heen via dieper gelegen

lagen weer verticaal naar boven komt bleek niet mogelijk. Wellicht kan een beter resultaat worden bereikt wanneer het gas op grotere diepte wordt geïnjecteerd.

5.4.1.4 Stijghoogte metingen

Een traditionele lekdetectiemethode is de hydrologische meetmethode waarbij de invloed van een grondwateronttrekking binnen een waterkerende constructie wordt gemeten door het plaatsen van peilbuizen voornamelijk binnen de constructie en het meten van de grondwaterstanden daarin bijvoorbeeld onder invloed van een grondwateronttrekking. Hoewel de diepte van het lek niet of moeilijk te bepalen is, is het een redelijk nauwkeurig meetmethode. De methode kost echter in het algemeen veel tijd, maar zal in een aantal gevallen bruikbaar zijn.

De technieken zijn gebaseerd op de eigenschap dat grondwater door een lek naar binnen of naar buiten stroomt. De detectie vindt plaats door het meten van de hydrologische eigenschappen zoals stijghoogte, stromingssnelheid en stromingsrichting.

Stroming van grondwater vindt plaats onder invloed van potentiaalverschillen. Aangezien grondwaterstroming zich met name door het lek concentreert, kan door het meten van grondwaterpotentialen onder invloed van een onttrekking binnen de constructie, een lek worden opgespoord. Bij grote bouwputten zijn hiervoor veel peilbuizen nodig. In veel gevallen is de strategie om na een eerste globale plaatsbepaling van het lek, een tweede serie peilbuizen te plaatsen die een nauwkeurigere plaatsbepaling van het lek oplevert. Alle peilbuizen moeten worden ingemeten ten opzichte van NAP. Al met al duurt het vaak lang voordat met voldoende nauwkeurigheid de locatie van het lek is vastgesteld. In het algemeen is het niet goed mogelijk om daarbij ook in verticale zin het lek te lokaliseren.

De methode blijkt goed geschikt wanneer er weinig tijdsdruk bestaat, bv. als opleveringsproef voor een permanente constructie.

De methode is met succes toegepast bij de oplevering van het Bouwdok te Barendrecht.

5.4.1.5 Stroomsnelheid en stroomrichtingsmetingen

Bij een potentiaalverschil binnen en buiten de constructie zal grondwaterstroming zich concentreren ter plaatse van het lek. Bovenstrooms zal in de nabijheid van het lek de grondwaterstroming afbuigen in de richting van het lek en de snelheid zal daarbij toenemen.

Een afgeleide manier om het lek op te kunnen sporen is om aan de hand van de grondwaterstroming de positie van het lek te traceren. Door op tenminste drie locaties de stromingsrichting als gevolg van de lekkage vast te stellen is te bepalen waar het lek zich bevindt. Er zijn een aantal apparaten bekend die stroming en richting van het grondwater kunnen meten. De metingen zijn gebaseerd op geïnduceerde temperatuurverschillen [lit.14] of op geluidsmetingen (Doppler-effect) [lit.15]. Veelal gebeurt dit vanuit een boorgat. Een lastig punt hierbij is de invloed van het boorgat op de bestaande stroming. Immers de weg van de minste weerstand wordt gekozen zodat de permeabiliteit van het boorgat gelijk moet zijn aan zijn omgeving.

Het meten van de stroomsnelheid (en – richting) van het grondwater is op zich een zeer directe manier om een eventueel lek op te sporen. Ondanks het feit dat diverse fabrikanten pretenderen nauwkeurig de stroomsnelheid en – richting van het grondwater te kunnen meten, zijn er ons nog geen praktijkresultaten bekend. De tot nog toe bijgewoonde demonstraties waren teleurstellend.

5.4.1.6 Camerasonde

Het constateren van een lek gaat het beste als je het lek ook daadwerkelijk kan zien. Dit is echter niet eenvoudig, immers in de grond kijken zal zich altijd beperken tot wat zich voor de lens bevindt: door de grond heen kijken is niet mogelijk tenzij afgeleide detectiemethoden ingebouwd zijn. Er is wel een wegdrukbaar sonde op de markt waar een minicamera is ingebouwd. Hiermee kan dus in de grond gekeken worden. Door GeoDelft is al ervaring opgedaan met de zogenaamde camerasonde. Het visualiseren van een lek met de camerasonde heeft als nadeel dat de camera slechts een lokaal beeld krijgt van de ondergrond zodat je voor het opsporen van het lek tot op korte afstand zou moeten komen.

Uit de uitgevoerde experimenten, in een ander kader, is gebleken dat stroming van water langs de sonde zichtbaar is, of hiermee echter de stromingsrichting wordt gevisualiseerd is onzeker. Mogelijk zouden er verbeteringen aan gebracht kunnen worden door bijvoorbeeld een kleurstof aan het grondwater toe te voegen.

Door op meerdere plaatsen te kijken kan uiteindelijk de positie van het lek worden bepaald.

Een groot voordeel ten opzichte van andere stroming detectiemethoden is dat dan niet alleen de aanwezigheid van een (water)stroming aangetoond wordt maar ook de richting van die stroming. Naar verwachting is een aanzienlijk ontwikkelingstraject noodzakelijk vooraleer met behulp van visuele detectietechniek lekken kunnen worden opgespoord.

Wellicht kan de camerasonde worden ingezet om zandinsluitingen in bentonietwanden op te sporen.

5.4.2 Detectie op thermische eigenschappen van het lek

5.4.2.1 Thermische sensor

Uitgangspunt van deze meetmethode is een temperatuurverschil, tussen het grondwater binnen en buiten de bouwkuip. Deze temperatuur verschillen zijn gebaseerd op het verschil in grondwaterstroming binnen en buiten de bouwkuip of het gebruik maken van de hydratatiewarmte van de uitharding van beton. Om temperatuurverschillen te kunnen meten worden in de grond sensoren geplaatst. In Duitsland is hier al enige ervaring mee opgedaan waarbij sensoren tot op een diepte van maximaal MV-30 m geplaatst worden. In de grote bouwkuipen in Berlijn had men veel last van te grote lekkage van de bouwkuipen en was er derhalve een stimulans om detectietechnieken te ontwikkelen. Door onder andere Duitse firma Texplor is hiermee al enige ervaring op gedaan [lit. 16].

Voor het uitvoeren van een temperatuurmeting zou de natuur een handje geholpen kunnen worden door het water in de bouwkuip (lokaal) op te warmen. Dit kan echter bij grote bouwkuipen op logistieke problemen en hoge kosten stuiten

5.4.2.2 Glasvezel

Een ander voorbeeld van thermische detectie is het gebruik van glasvezelkabel om de temperatuur te meten. In Duitsland zijn een aantal experimenten uitgevoerd waarbij de glasvezel is ingebouwd in dijken en onder een kanaal [lit. 17]. Het idee achter de temperatuur gevoelige glasvezel is dat de reflecties afkomstig van een lasersignaal dat door de glasvezel wordt gestuurd variëren met de temperatuurveranderingen. Omdat de glasvezel in een nieuw aan te leggen constructie moet worden ingebouwd is het geen methode die overal kan worden toegepast, maar alleen daar waar vooraf wordt ingeschat dat het van belang is om mogelijke lekkages op te kunnen sporen. Dit is vergelijkbaar met de methode waarbij een folie met een grid van draden de lekkages onder bv een vuilstort kan

detecteren. De toepassing van glasvezeltechnologie voor lekdetectie is echter interessant genoeg om de ontwikkelingen in de toekomst te blijven volgen.

5.4.3 Detectie op basis van akoestische eigenschappen

5.4.3.1 Akoestische emissie en seismische tomografie

Akoestische emissie is een fenomeen dat op kan treden als gevolg van een mechanisch effecten in de ondergrond. De techniek stamt uit een onderzoek in de jaren dertig naar gesteentes, waarbij werd ontdekt dat gesteente onder druk geluid produceert. Deze micro-seismic, ook wel acoustic emission of seismo-acoustic genoemd, wordt ook toegepast bij het opsporen van breuken in leidingen op de zeebodem. De breuk produceert een akoestisch signaal afkomstig van het onder druk ontsnappen van gas.

Naast de akoestische emissie, waarbij een sensor het geluid registreert, wordt ook de zogenaamde sonic techniek toegepast (seismische tomografie). Hierbij wordt niet alleen naar een signaal geluisterd, maar wordt naast een sensor ook een actieve bron gebruikt. Het materiaal tussen bron en ontvanger wordt zodoende akoestisch doorgelicht. Afwijkingen van het materiaal als gevolg van bijvoorbeeld veranderende drukken in het materiaal kunnen zodoende akoestisch geregistreerd worden aan de hand van verschillen in loopsnelheden van het uitgezonden signaal [lit.18]

Voor het succesvol toepassen van akoestische emissie bij lekdetectie in waterkerende constructies zal het lek een meetbaar geluid moeten produceren. Hoewel het sterk afhangt van de praktijksituatie lijkt het niet erg waarschijnlijk dat er lekken zullen zijn die voldoende geluid produceren om zich van de achtergrondruis te kunnen onderscheiden. Immers, er is altijd achtergrondruis en bovendien is er een verschil met bijvoorbeeld lekkende gasleidingen: er is minder drukverschil over het lek dan bij de gasleiding, en derhalve minder mogelijkheden om geluid te produceren.

5.4.4 Detectie op basis van chemische verschillen

Chemische technieken kunnen gebaseerd zijn op verschillen in samenstelling van het grondwater binnen of buiten een waterremmende constructie. Chemische technieken kunnen ook worden toegepast wanneer kunstmatig toevoegingen aan het grondwater (tracers) worden toegevoegd. Een algemeen bezwaar bij tracertoepassingen zijn afhankelijk van de gebruikte tracer de eventuele milieueffecten bij toepassing.

In specifieke gevallen kan het voorkomen dat de kwaliteit van het grondwater buiten de waterremmende constructie significant verschilt van de kwaliteit daarbinnen. In geval van verticale wanden zal dit overigens zelden het geval zijn omdat in de meeste gevallen voorafgaand aan de constructie van de wand aan beide zijden dezelfde waterkwaliteit voorkomt en deze niet wijzigt door het aanbrengen van de wand.

Bij constructies waarbinnen de grondwaterstand wordt verlaagd kan in voorkomende gevallen een kwaliteitsverschil tussen kwelwater en horizontaal toestromend water worden gedetecteerd. In het algemeen zal de detectie dan echter niet op basis van chemische parameters maar op basis van geleidbaarheidsverschillen (bv. zoute kwel, zie: chemische technieken) of temperatuurverschillen (zie: thermische technieken) plaatsvinden.

Bij toepassing van additieven in het grondwater kan worden gedacht aan kleurstoffen, chemicaliën en radio-actieve tracers. Deze laatste worden maatschappelijk nauwelijks aanvaard met het oog op de milieuhygiënische consequenties en worden vooralsnog buiten beschouwing gelaten. Zowel voor chemicaliën als kleurstoffen geldt in het algemeen dat de tijdsduur voordat de toegevoegde stof zal worden gedetecteerd in het algemeen groot zal zijn.

5.4.4.1 Electrisch detecteren met behulp van een tracer

De tekortkomingen van het geo-elektrisch meten (zie: 5.4.4), waarbij elektrisch geleidende materialen in de ondergrond de preferente grondwater stroombaan bepalen, kan juist ingezet worden om de grondwaterstroming in kaart te brengen, wanneer er een elektrisch geleidende tracer wordt toegevoegd. De tracer wordt meegevoerd door de grondwaterstroming waarvan de preferente stroming in de richting van het lek is. Door de tracer is de grondwaterstroming gelabeld en kan deze gevolgd worden. Vanaf het maaiveld kan deze stroombaan in kaart gebracht worden met behulp van geleidbaarheidsmetingen, waarbij elektroden, van het geo-elektrische meetsysteem, op het maaiveld de spanningsverdeling in de ondergrond meten. De variatie in de spanningsverdeling is een maat voor de richting van de preferente stroombaan en wijst dus in de richting van het lek. De lekkage kan op deze wijze gedetecteerd worden.

Omdat het voor deze methode noodzakelijk is om een tracer aan het grondwater toe te voegen, in dit geval een elektrische geleider zoals bv. keukenzout, kan er uit milieutechnisch oogpunt een bezwaar zijn deze methode toe te passen. Het is echter zo, dat het veelal om een gecontroleerde toevoeging van NaCl gaat met een beperkt verspreidingsgebied.

Een ander punt is de snelheid waarmee de methode resultaten genereert: deze is sterk afhankelijk van de lokale stroomsnelheid van het grondwater. Door te variëren met de grondwaterspiegel binnen en buiten de bouwkuip is er enige invloed uit te oefenen op de snelheid van de grondwaterstroming. De grondwaterstroming is echter gerelateerd aan de afmetingen van het lek en dus indirect ook aan de grootte van het lekkage probleem. Een groot lek zal in de regel eenvoudiger opgespoord kunnen worden dan een klein lek.

5.4.5 Detectie op basis van geometrische eigenschappen

5.4.5.1 Grondradar

Grondradar is een niet-destructieve techniek waarbij met behulp van elektromagnetische golven een afbeelding van de ondergrond wordt gemaakt. De techniek wordt onder ander toegepast voor het in kaart brengen van kabels en leidingen en het opsporen van obstakels in de ondergrond. Ook wordt de grondradar ingezet voor het bepalen van laagdikten, het in kaart brengen van geologische structuren en de grondwaterspiegel. De bepalende parameter voor de meetmethode is de relatieve diëlektrische constante (ϵ_r) van de diverse materialen in de ondergrond. Deze parameter bepaalt de mate van reflectie en de voortplantingssnelheid van de golf in het medium. Hierdoor kan bijvoorbeeld een gat in een

waterkerende constructie als een afwijkende reflectie ten opzichte van zijn omgeving weergegeven worden in de radarbeelden.

De penetratie van de elektromagnetische golven is afhankelijk van de elektrische geleidbaarheid van de ondergrond (klei heeft een relatief hoge en zand een relatief lage elektrische geleidbaarheid). Hierdoor is het bijvoorbeeld mogelijk om gaten in een horizontale afsluitende kleilaag te onderscheiden. Het is ook mogelijk om de methode onder water toe te passen mits de geleidbaarheid van het water niet te hoog is: in brak en zout water is het niet mogelijk betrouwbaar te meten, hetzelfde geldt bijvoorbeeld voor klei, veen en bentoniet.

Het inzetten van grondradar ten behoeve van lekdetectie in verticale waterkerende constructies is om geometrische redenen slecht uitvoerbaar. Indien de verticale wand vanaf het maaiveld aangestraald wordt, zullen de reflecties aan de wand niet bij de ontvangkant van de antenne terugkomen. Indien de verticale wand voldoende breedte heeft zou bovenop de wand gemeten kunnen worden, waarbij afwijkingen van de wandstructuur zichtbaar worden in de afbeelding van de radarreflecties. In de praktijk zal deze situatie waarschijnlijk niet voorkomen. Wellicht kan met metingen vanuit boorgaten een enigszins beter resultaat worden bereikt.

5.4.5.2 Seismische metingen

Seismische methoden zijn gebaseerd op het afbeelden van de ondergrond met behulp akoestische signalen die reflecteren bij variërende akoestische impedanties van de ondergrond. Er wordt onder andere een onderscheid gemaakt tussen ruimtelijke golven zoals druk- en schuifgolven, en grensvlak golven zoals Rayleigh (lucht-grond) en Stoneley(grond-water) golven. De ruimtelijke druk- en schuifgolven worden veel toegepast bij het in kaart brengen van geologische structuren in de ondergrond. Voor toepassing in de lekdetectie zijn dit type reflecties minder geschikt omdat de resolutie te laag is voor het detecteren van kleine gaten.

Het toepassen van grensvlaktgolven biedt mogelijk meer perspectief. Door gebruik te maken van grensvlaktgolven is de geometrische verandering in de signatuur van de grensvlaktgolven terug te vinden. Immers deze type golven verplaatsen zich op een grensvlak tussen twee materialen met een verschillende akoestische impedantie. Een lekkage bevindt zich per definitie ook op zo'n grensvlak. Als een grensgolf het lek passeert zal de vorm van het signaal veranderen ten opzichte van de situatie waarbij zich geen lekkage in de constructie bevindt. Dit verschil in signaalgang is een aanwijzing voor de aanwezigheid van een lekkage. Uit de looptijden en de voortplantingssnelheid van het uitgezonden signaal is de afstand van het lek tot de seismische bron te traceren. Echter ook hier speelt de nauwkeurigheid van het detectiesysteem een belangrijke rol: de exacte plaatsbepaling is een probleem, zeker in een praktijksituatie waarbij een grensvlak niet glad is en reflecties en vervormingen niet alleen van een lekkage afkomstig zullen zijn, maar van alle mogelijke oneffenheden in de waterkerende constructie [lit.19].

5.4.6 Detectie op basis van mechanische eigenschappen

5.4.6.1. Slotverklikker

Zoals in de beschrijving van de damwandconstructies al is aangegeven, wordt in het algemeen het uit het slot lopen van een damwandplank niet opgemerkt gedurende de werkzaamheden. Voor het

plaatsen van damwanden is een slotverklikker ontwikkeld. De meest gebruikte methode is de damwand slotverklikker met breekpen. Het meetsysteem wordt gevormd door een gesloten elektrisch circuit dat onder in het slot van een damwandplank wordt aangebracht. Wordt bij het inbrengen van een plank geconstateerd dat het slot breekt, dan is daarmee nagenoeg met zekerheid bepaald dat de plank in het slot is aangebracht. Bij dit systeem moet een elektrische bedrading naar de voet van elke damwandplank worden aangebracht. Het betreft hier overigens een preventieve methode.

5.4.6.2 Betontester (Hamertje tik)

Een betontester wordt gebruikt voor kwaliteitscontrole van heipalen. Indien een damwand een gat vertoont zal ook hier en reflectie van het akoestische signaal optreden in verband met de veranderende dichtheden. Deze reflectie kan een maat zijn voor de aanwezigheid van een gat in een wand. Moeilijkheid is dat er in tegenstelling tot heipalen, waar de hoofdrichting van het akoestische signaal vertikaal is, er in de wand sprake is van een vlak, waar uit meerdere richtingen reflecties kunnen binnenkomen. Voordeel bij een wand is dat deze op meerdere punten (in een lijn aan de bovenkant) aangeslagen kan worden om zodoende een completer beeld van reflecties te krijgen. Vergelijkbaar met afbeeldingstechnieken zal de top van de hyperbool de positie van het lek kunnen verraden.

5.4.6.3 Sonderen (bijvoorbeeld met piezocone en/of dissipatietest)

Het sonderen, bij voorkeur met meting van waterspanningen (Piezoconesondering) is een standaard beschikbare techniek, die goed toepasbaar is voor het detecteren van discontinuïteiten in natuurlijke waterremmende lagen. Sonderen en boren zijn destructieve technieken en daardoor vaak ongewenst (bv. folieconstructies). Voor het detecteren van lekken in verticale waterremmende constructies is de methode wegens het veelal groot aantal benodigde sonderingen arbeidsintensief, omslachtig en tijdrovend. Sonderingen kunnen in voorkomende gevallen wel waardevolle aanvullende informatie leveren, bijvoorbeeld bij het in kaart brengen van de gevolgen van een lek (teruglopende conusweerstand ter plaatse van ontgrondingen ter plaatse van lekken).

In combinatie met sondetechnieken zijn overigens een groot aantal meetmethoden mogelijk. Deze worden in het algemeen bij de betreffende methode behandeld.

6 Beoordeling methoden

Het doel van deze studie is om, op grond van de gesprekken en de uitgevoerde inventarisatie van bestaande en mogelijk te ontwikkelen methoden, te komen tot een keuze van een of enkele veelbelovende methoden die geschikt zijn om verder te ontwikkelen, c.q. te introduceren.

De beoordeling heeft plaatsgevonden door twee sporen te volgen:

In de eerste plaats is een aantal criteria opgesteld waarop de te ontwikkelen methode dient te worden getoetst. Deze criteria zijn beschreven in paragraaf 6.1

Daarna zijn de geïnventariseerde methoden getoetst aan de criteria. Deze toetsing is visueel weergegeven in een tabel (Bijlage 1). In paragraaf 6.2 zijn de resultaten van de toetsing beschreven en toegelicht.

In paragraaf 6.3 wordt nog ingegaan op mogelijke combinaties van technieken die niet eerder in de inventarisatie zijn genoemd.

6.1 Criteria

De volgende criteria zijn toegepast op de geïnventariseerde technieken (zie ook bijlage 1), waarbij als algemene voorwaarde kan worden gesteld dat een lekdetectiemethode in staat dient te zijn een lek in de orde van enkele m³/uur (of met oppervlakte van ca. 1 m²), op ca. 10 m nauwkeurig te bepalen in een horizontale of verticale waterremmende constructie tot een diepte van ca. 20 m.

De hier genoemde eisen zijn arbitrair doch geven een redelijke indruk van de omvang en hoedanigheid van lekkages die in de civiele praktijk tot problemen hebben geleid en die in de meeste gevallen hebben geleid tot schadeposten (oponthoud en schade aan de omgeving in de orde van honderdduizenden tot miljoen guldens.

De diverse technieken zijn gewogen op basis van de volgende beoordelingen:

- Technische beoordeling

ad.1 Bewezen techniek

Meettechnieken waarvan de werking is bewezen en algemeen wordt aanvaard hebben een voordeel boven technieken welke momenteel (nog) onderwerp van discussie zijn. Met name wanneer er voorbeelden van succesvolle toepassingen als lekdetectietechniek bekend zijn, mag worden verwacht dat verdere ontwikkeling van de methode kansvol is.

ad. 2 Meerdere materialen

Technieken die toepasbaar zijn voor verschillende materialen van ondoorlatende schermen genieten de voorkeur boven technieken die slechts voor één materiaal toepasbaar zijn.

ad. 3 Horizontaal/verticaal

Hetzelfde geldt voor de mogelijkheid om lekkage in verticale en horizontale wanden te meten. Technieken waarmee alleen lekkage in horizontale of alleen in verticale wanden kan worden gemeten zijn minder aantrekkelijk dan methoden die alleen voor horizontale of alleen voor verticale wanden geschikt zijn.

ad. 4 Invloed storende elementen

De gevoeligheid van een techniek voor verstoringen maakt de techniek minder aantrekkelijk. Voorbeelden zijn: damwanden als storende invloed bij geoelektrische technieken, omgevingsgeluid bij akoestische metingen, zout grondwater als verstoring bij geoelektrisch meten.

ad. 5 Onderscheidend vermogen

Hierbij zijn twee aspecten van belang: de resolutie van de meting, m.a.w. kan voldoende nauwkeurig worden gemeten om de afwijkende meetwaarde te detecteren; daarmee hangt ook samen de vraag of de range van mogelijke meetwaarden voldoende afwijkt van natuurlijke meetwaarden en de fluctuaties daarvan om daaraan conclusies te kunnen verbinden. Een voorbeeld is de gasdetectiemethode welke is getest in Barendrecht. De mogelijk te detecteren invloeden waren aanzienlijk kleiner dan de dagelijkse fluctuaties in het CO₂-gehalte in de bodem. Methoden waarvan de meetrange duidelijk buiten de natuurlijke meetwaarden liggen en die bovendien sterk worden beïnvloed door een anomalie in het te detecteren materiaal, hebben de voorkeur.

- Financiële beoordeling

ad. 1 Meetkosten

Bij deze beoordeling speelt voornamelijk de tijdsduur een rol. De benodigde tijdsduur bestaat uit de mobilisatie- en organisatietijd, de meetduur en de interpretatietijd.

De kosten voor het uitvoeren en interpreteren van de metingen zullen in het algemeen een klein gedeelte van de totale kosten uitmaken.

ad. 2 Ontwikkelingskosten

Technieken waarvoor geen nieuwe apparatuur en/of interpretatiemethoden ontwikkeld moeten worden hebben de voorkeur, omdat zij op kortere termijn beschikbaar komen en omdat de ontwikkelingskosten beperkt zijn.

ad. 3 Risico's

Naarmate de voorgenomen ontwikkelingen minder faalrisico's met zich meenemen is de te ontwikkelen methode aantrekkelijker.

In bijlage 1 is – per detectietechniek – de afweging van de diverse criteria zichtbaar gemaakt.

6.2 Tracers

Bij het gebruik van tracers valt voornamelijk het onderscheid te maken tussen chemische tracers en elektrische tracers. Daarnaast kunnen bijzondere tracers de kleurstoffen en radio-actieve tracers worden genoemd.

Chemische tracers hebben als nadeel dat ze in het algemeen in te installeren filters gemeten moeten worden, zich betrekkelijk langzaam verplaatsen en voor een aantal tracers geldt dat er milieuhygiënische bezwaren bij optreden.

Kleurstoffen hebben in principe dezelfde bezwaren. Maatschappelijk is het aanbrengen van radio-actieve tracers nauwelijks meer aanvaardbaar.

Hierdoor blijven in wezen slechts elektrische tracers (stroomstoot/zoutoplossingen) over. Deze tracers worden bij de betreffende detectie methoden behandeld.

6.3 Technieken

6.3.1 Preventieve technieken

Preventieve technieken vallen in feite buiten het kader van dit onderzoek. Toch moet worden opgemerkt, dat het voorkomen van lekkage in een waterremmende constructie te allen tijde aanmerkelijk goedkoper en efficiënter is dan het achteraf opsporen en repareren van een lek. Met name waar de risico's bij optredende lekkage groot zijn adviseren wij om altijd gebruik te maken van de beschikbare preventieve methoden. Het komt ons voor dat op het gebied van preventieve methoden aanzienlijke verbeteringen mogelijk zijn.

6.3.2 Detectie op basis van stromingsverschillen

6.3.2.1 Geoëlektrische methoden

Met geoëlektrische metingen blijkt het mogelijk om een breed scala aan eigenschappen van constructieve materialen, bodem en grondwater te meten. Bij toepassing van deze methoden kunnen echter met name sterk geleidende materialen voor storende invloeden zorgen. Daarentegen zijn bijvoorbeeld goede resultaten bij folies behaald.

Sterke voordelen zijn snelheid en eenvoud, de methoden kunnen goed worden toegepast vanaf maaiveld.

Door het toedienen van een zoutoplossing (geoëlektrische methode) of een stroomstoot IP-meting kan wellicht het nadeel van de storende damwanden worden verminderd of mogelijk geëlimineerd, omdat veranderingen van elektrische eigenschappen worden gemeten. De methode waarbij een stroomstoot wordt toegediend werkt daarenboven snel.

Het toedienen van een zoutoplossing als tracer leidt tot langdurige meetperioden

Er is hier – met name door combinatie van technieken – sprake van detectiemethoden die veelbelovend zijn. De meetmethoden zijn in principe operationeel, doch de combinatie met bv. een

stroomstoot of een andere tracer zijn nieuw. Wellicht is door de combinatie stroomstoot aanpassing van de meetmethode en verbetering van de resolutie noodzakelijk. Bovendien moet ervaring worden opgedaan met het interpreteren van de resultaten onder verschillende omstandigheden.

Het verder ontwikkelen van deze methode lijkt op een redelijke termijn, met een redelijk risicogehalte en tegen aanvaardbare kosten uitgevoerd te kunnen worden.

6.3.2.2 ECR en EFT

Voor de ECR/EFT-methode geldt ongeveer hetzelfde als voor de geoëlektrische methode, met dien verstande dat de optie met stroomstoot als principe operationeel is, doch nog niet is toegepast in Nederland. Door de ECR/EFT- methode in een praktijk situatie in Nederland toe te passen kan inzicht worden verkregen in de toepasbaarheid en de eventuele verdere ontwikkelingspotenties. Nader inzicht in het basisprincipe van deze methode is hiervoor noodzakelijk.

6.3.2.3 Gasinjectie

De tot nu toe bekende resultaten waarbij gebruik wordt gemaakt van gasdetectietechnieken zijn weinig aansprekend. Dit wordt overigens voor een groot deel veroorzaakt door de wijze waarop de techniek praktisch is toegepast (zeer oppervlakkige injectie) en door de keuze van het tracergas (CQ). Om de achtergrond ruis als gevolg van natuurlijk aanwezig CO₂ te onderdrukken is de proef met helium herhaald. Met Helium kan een beter resultaat worden bereikt, mits de injectie op grotere diepte plaatsvindt dan tot nu toe is gedaan. Hiermee vervalt dan echter voor een deel de efficiëntie van de methode, omdat een aantal gasinjectiepunten moet worden geboord. Waarschijnlijk geldt hetzelfde voor de detectiepunten. Deze zullen zich ook op grotere diepte moeten bevinden.

De mogelijkheden om gasdetectie te ontwikkelen tot een snelle en efficiënte lekdetectietechniek worden dan ook niet hoog ingeschat.

6.3.2.4 Stijghoogte metingen

Methoden waarbij gebruik wordt gemaakt van stijghoogtemetingen onder invloed van grondwateronttrekking, zijn tijdrovend en daardoor kostbaar. De methode is qua uitvoering redelijk goed ontwikkeld, de interpretatie is redelijk eenvoudig.

Gezien de tijdsduur (installatie peilbuizen, interpretatie) van hydrologische detectiemethoden gebaseerd op stijghoogtemetingen, wordt binnen dit onderzoek niet geadviseerd om deze techniek verder te ontwikkelen. Wellicht kan in voorkomende gevallen waarin deze techniek wordt toegepast de efficiëntie worden opgevoerd.

In zandpakketten kan wellicht toepassing van de grondradar de snelheid waarmee grondwaterstanden worden gemeten doen toenemen.

6.3.2.5 Stroomsnelheid en stroomrichtingsmetingen

Methoden waarbij de snelheid en de richting van de grondwaterstroming in-situ worden gemeten zijn, wanneer deze toegepast kunnen worden in combinatie met een sondeertechniek, goed toepasbaar en eenvoudig te interpreteren. Afhankelijk van de meetmethode worden weinig storende invloeden verwacht. Voor zover bekend zijn echter de resultaten van de metingen nog weinig betrouwbaar bij geringe stroomsnelheden van het grondwater. Naar verwachting zullen de ontwikkelkosten dan ook hoog zijn en het faalrisico aanzienlijk.

6.3.2.6 Visuele technieken

Visuele technieken, bijvoorbeeld ontgraving kan slechts in beperkte mate worden toegepast. Indien echter de mogelijkheid tot ontgraven van de constructie aanwezig is, verdient deze de voorkeur omdat de reparatie van het lek hiermee eenvoudig wordt gemaakt. Voor het detecteren van lekken zijn zij meestal ongeschikt, duur en tijdrovend door de noodzaak van voorzorgsmaatregelen zoals steunconstructies, bemaling enz.

De camerasonde biedt voorlopig weinig perspectief wegens het geringe doorzicht rondom de sondeerconus.

Wanneer met de camerasonde de stroomrichting van het grondwater kan worden vastgesteld geeft dit wellicht meer mogelijkheden. Voor specifieke zaken als bijvoorbeeld het opsporen van zandinsluitingen in cementbentonietwanden lijkt de camerasonde een geschikt instrument.

6.3.3 Detectie op thermische eigenschappen van het lek

6.3.3.1 Thermische sensor

Thermische technieken waarbij gebruik wordt gemaakt van de – van nature – afwijkende temperatuur van kwelwater zijn toepasbaar voor lekdetectie in horizontale constructies, onder voorwaarde dat een natuurlijk temperatuurverschil aanwezig is; hiermee is het toepassingsgebied te beperkt om een investering in de verdere ontwikkeling te wettigen.

Ditzelfde geldt voor de detectie van hydratatiewarmte. Ook hier is het toepassingsgebied te beperkt. Wanneer aan de voorwaarden voor toepassing is voldaan, kunnen temperatuurmetingen overigens wel een waardevolle bijdrage leveren. Het blijven volgen van methoden gebaseerd op temperatuurmetingen wordt dan ook aanbevolen.

6.3.3.2 Glasvezel

Voor zover deze methode valt onder ‘preventieve maatregelen’ wordt zij buiten het bestek van dit onderzoek gelaten. De glasvezeltechnologie ontwikkelt zich echter snel zowel qua inbrengmethoden als toepassingsgebieden. Het verdient daarom aanbeveling deze ontwikkelingen te blijven volgen.

6.3.4 Detectie op basis van akoestische eigenschappen

6.3.4.1 Akoestische emissie en seismische tomografie

De toepasbaarheid van akoestische methoden is vrij onzeker. Gevreesd wordt dat in veel gevallen geluid en trillingen van bijvoorbeeld verkeer, bouwmaterieel enzovoort interpretatie sterk zullen bemoeilijken.

Vooralsnog worden de kansen voor akoestisch onderzoek dan ook niet hoog ingeschat.

6.3.5 Detectie op basis van chemische verschillen

6.3.5.1 Elektrisch detecteren met behulp van een tracer

Waar chemische technieken zijn gebaseerd op het verschil in (natuurlijke) chemische samenstelling tussen het grondwater binnen en buiten de constructie, zal het toepassingsgebied klein zijn, met name verticale wanden. In geval van milieutechnische wanden liggen de mogelijkheden wellicht gunstiger. In veel gevallen zal dan toepassing van een thermische of een elektrische/geoëlektrische methode sneller en efficiënter zijn.

Bij horizontale constructies (folies), zal in meer gevallen de natuurlijke chemische samenstelling van het grondwater buiten de constructie afwijken van de samenstelling er binnen. Ook in dit geval zijn elektrische/geoëlektrische methoden meestal sneller en efficiënter.

Wanneer de (chemische) tracer wordt toegevoegd zal in het algemeen de detectie veel tijd in beslag nemen.

6.3.6 Detectie op basis van geometrische eigenschappen

6.3.6.1 Grondradar

(Geo)radartechnieken zijn toepasbaar om goed geleidende materialen op te sporen. Door de beperkte detectiediepte (ordegrootte 5 m), is de toepasbaarheid van radartechnieken echter beperkt. Het ligt niet in de verwachting dat op korte termijn de apparatuur is te ontwikkelen waarmee tot aanmerkelijk grotere diepte kan worden gemeten.

6.3.6.2 Seismische metingen

Evenals voor akoestische methoden wordt gevreesd, dat in veel gevallen de nauwkeurigheid van het detectiesysteem ongunstig zal worden beïnvloed door geluid en trillingen (zie 6.3.4.1).

6.3.7 Detectie op basis van mechanische eigenschappen

6.3.7.1 Slotverklikker

De slotverklikker is een preventieve methode en valt als zodanig buiten het bestek van dit onderzoek.

6.3.7.2 Betontester (hamertje tik)

Evenals de overige metingen die zijn gebaseerd op de meting van akoestische eigenschappen (6.3.4.1 en 6.3.6.2), wordt verwacht dat het oplossend vermogen van deze methoden niet voldoende is als gevolg van mogelijke invloeden van overig geluid en van trillingen. Uiteraard zijn deze technieken alleen denkbaar voor harde materialen zoals stalen damwanden, betonwanden etc.

6.3.7.3 Sonderingen

Het sonderen, bij voorkeur met meting van waterspanningen (Piëzoconussondering) is een standaard beschikbare techniek, die goed toepasbaar is voor het detecteren van discontinuïteiten in natuurlijke waterremmende lagen. Voor het detecteren van lekken in verticale waterremmende constructies is de methode arbeidsintensief en dienen de sonderingen te worden gecombineerd met aanvullende metingen. Sonderingen kunnen in voorkomende gevallen wel waardevolle aanvullende informatie

leveren, bijvoorbeeld bij het in kaart brengen van de gevolgen van een lek (teruglopende conusweerstand ter plaatse van ontgroningen als gevolg van lekken).

7 Conclusies en aanbevelingen

Naast de noodzaak tot verbetering van lekdetectietechnieken bij het ontwerp en uitvoering van waterremmende constructies concluderen wij dat het nemen van preventieve maatregelen in veel gevallen kan leiden tot het voorkómen van schade door lekkages. Een risicoverkenning vooraf kan een goed hulpmiddel zijn voor het plannen van preventieve maatregelen.

Een risicoverkenning houdt in dat de belangen en kwetsbaarheden in de omgeving in kaart zijn gebracht en dat de faalmechanismen van de constructie zijn verkend. Tevens dient inzicht te bestaan in de toelaatbare debieten in relatie tot de vergunningverlening en mogelijk optredende schade.

Daarnaast is het noodzakelijk om zowel de aanleg van de constructie te monitoren, afwijkingen te rapporteren en zo nodig passende maatregelen te nemen en hiervan ook verslag uit te brengen. Daarnaast is het monitoren van grondwaterstanden ter plaatse van kwetsbare locaties van belang. Hierbij dienen vooraf limieten te worden gesteld, er dient te worden gerapporteerd en zo nodig moeten maatregelen worden genomen, waarvan eveneens verslag moet worden gelegd.

Wanneer desondanks lekkage van constructies optreedt zullen geofysische lekdetectie methoden, waarbij gebruik wordt gemaakt van de elektrische eigenschappen zoals elektrische weerstand en spontane potentiaal van bodem, grondwater en constructiemateriaal voorlopig het meest perspectief bieden. Het toedienen van een tracer (bv. zoutoplossing) of het toedienen van een stroomstoot met het doel om door interpretatie van verschildmetingen te komen tot lokalisatie van een lek zal tot een sterkere verbetering van de technieken te kunnen leiden.

Aanbevelingen:

Geoëlektrische geofysische technieken, specifiek gericht op lekdetectie dienen verder ontwikkeld te worden. Hierbij valt te denken aan het geoelektrisch of elektromagnetisch meten van de invloed van een stroomstoot en/of het simultaan uitvoeren van meerdere meettechnieken.

Wij adviseren om het vervolgonderzoek globaal als volgt in te richten:

- nadere bestudering van de bestaande geofysische meetmethoden (m.n. verdieping van de kennis omtrent SP-methoden) en een theoretische benadering van de mogelijkheden om – onder verschillende omstandigheden – de invloed van een kunstmatig aangebrachte tracer te meten en te interpreteren. In eerste instantie te denken aan stroomstoot en zoutoplossing als tracers.
- het uitvoeren van een proef met de ECR/EFT-methode, bv. bij een bestaand lek om de methode te verifiëren en tekortkomingen te inventariseren; bij toepassing van deze methode tevens andere meetmethoden (geoëlektrisch/elektromagnetisch) inzetten. Het verifiëren van de methode
- het opstellen van een programma van eisen voor de verdere ontwikkeling van de detectiemethode
- het aanpassen van meetapparatuur en optimaliseren van het meet- en interpretatieprotocol

- het – in Nederland – introduceren van de geoptimaliseerde techniek

8 Referenties

- [1] [Taat, ir. J.] Praktijkproef gasdetectiesysteem te Etten-Leur, Grondmechanica Delft, CO-372660/23, januari 1998
- [2] [Taat, ir. J.] Praktijkproef gasinjectiesysteem te Etten-Leur-2, Grondmechanica Delft, CO-383200/18, september 1998
- [3] Laboratory studies on a new laser doppler velocimeter system for horizontal groundwater velocity measurements in a borehole, Water Res. Res., vol. 29, pp. 283-291, February 1993
- [4] [Sellmeijer et al.] Hydraulic Resistance of Steel Sheet Pile Joints, Journ. of Geotechnical Engineering, Vol. 121, no. 2, February 1995
- [5] [van Meerten, ir. J.J.] CUR-Handboek folieconstructies, M311-01, Gouda, 1993
- [6] [van Mechelen et al.] Traditionele en minder traditionele toepassingen van weerstandsmetingen, GeoSurvey, 1996
- [7] [Nijdeken, G.J.] Scheuren in folie, TNO-GG, Delft, 1993
- [8] [van Dalssen, ir. W.] Numerieke simulatie lekdetectie, TNO-GG, Delft, 1994
- [9] www.crrel.usace.army.mil A doppler velocimeter for monitoring groundwater flow, US Army Corps of Engineers
- [10] Damwandconstructies, CUR-publicatie 166, Gouda, 1993
- [11] [Admiraal, ir. B.J.] Lekdetectiesystemen voor bouwputten en andere ondergrondse waterremmende constructies, Geotechniek 4 (2000), nr. 2, p.28
- [12] [Nijdeken, G.J.] Scheuren jagen in folie, Land en Water, 1994, nr. 7
- [13] Projectblad ECR/EFT technologie, Texplor Exploration and Environmental technology GmbH
- [13a] Europees octrooi EP 0729590 C19-94)
- [14] Geoflo, informatie van Mateboer Milieutechniek

- [15] [Momii et al.] Laboratory studies on new laser Doppler velocimeters system, Water res. research, Vol. 29, no.2, February 1993
- [16] [Dornstadter, J.] Nachweis von Sickerströmungen mittels Bodentemperatur messungen, Geol. Ges., 1992
- [17] [Aufleger et al] Fibre optic temperature measurements for leakage detection. Symp. on rehabilitation of dams, November 1998
- [18] [Drnevich and Gray] Acoustic emissions in geotechnical engineering practice, An. Soc. for testing and materials, juni 1981
- [19] [Maser and Kaelin] Leakage detection of liners using seismic boundary waves, Barrier Technology, 1985

BIJLAGEN

710104.0002 Bijlage 1

	Geo-elektrisch	ECR-EFT	Stijg hoogte	Gas injectie	Stromingmeter	Camera sonde	Temperatuur sensor	Glas vezel	Akoestische emissie	Elektrisch met tracer	Seismiek	Radar	Slot verklikker	Beton tester
Technische beoordeling	+	+	+	0	0	0	+	0	+	+	+	+	+	+
Bewezen techniek	+	0	+	-	-	-	0	-	0	+	-	-	+	-
Toepasbaar op meerdere materialen	-	+	+	+	+	+	+	0	0	+	0	-	-	+
Toepasbaar horizontaal	+	+	+	0	0	0	-	+	0	+	0	+	-	-
Toepasbaar vertikaal	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	-	-	+	+
Aanhechting met verticale wand	+	+	+	0	0	0	0	+	0	+	-	-	-	-
Onderscheidend vermogen	0	0	-	0	0	0	0	0	-	0	-	0	+	-
Toepasbaar bij geleidende materialen	-	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Toepasbaar bij laagstructuren	+	+	0	-	0	+	0	+	0	+	-	0	+	0
Eenduidigheid	0	0	0	-	0	0	0	0	-	0	-	0	+	-
Milieuhygiene	+	+	+	0	+	+	0	+	+	0	+	+	+	0
Toepassing bij oplevering	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	0	+	+	+
Toepassing in gebruiksfase	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0	-	0	-	0
Beperkt ruimtegebruik	+	+	+	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+
Uitvoeringstijd (kort)	+	+	-	0	0	0	-	-	0	0	-	+	+	+
Uitvoeringskosten (laag)	0	+	0	-	0	-	-	-	0	0	-	-	+	+
Ontwikkelingskosten (laag)	+	0	+	-	0	0	0	-	0	+	-	0	+	-
Eindoordeel	0	+	+	-	0	-	0	-	-	+	-	-	+	-

Beoordeling detectiemethoden ten behoeve van lekdetectie. Het eindoordeel is gebaseerd op de in de tabel genoemde beoordelingscriteria.

Legenda:

- +
 - 0
 -
- goed, gunstig
neutraal
slecht, ongunstig