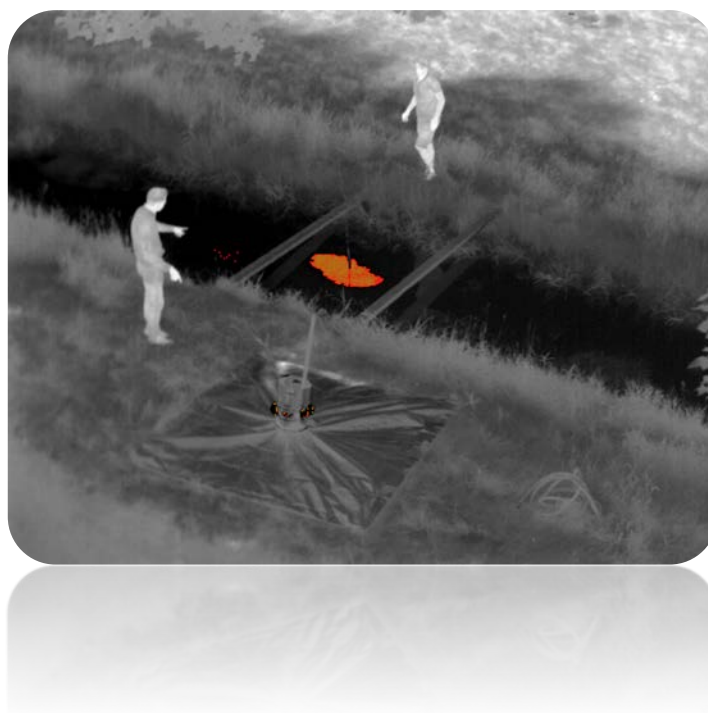


DMN

DIJK MONITORING NEDERLAND

INFRAROODMETINGEN BIJ DIJKEN

Haalbaarheidsstudie voor de PoV Piping



Opgesteld door:
VOF Dijk Monitoring Nederland

Onne Rösingh (InTech BV)
Maurits Enschedé (InTech BV)
Ilse Groenouwe (Arcadis Nederland B.V.)
Niek Reichart (Arcadis Nederland B.V.)
Wouter Zomer (BZ Ingenieurs en managers)
Jan Gert Rinsema (BZ Ingenieurs en managers)

Document nummer: 170719RAP.V11
Datum: 13 december 2017
Status: definitief

Voorwoord

Sinds 2007 is door diverse marktpartijen in samenwerking met Stichting FloodControl IJkdijk onderzoek gedaan naar mogelijke sensortechnieken die gebruikt kunnen worden voor het inspecteren en monitoren van waterkeringen. Voor het faalmechanisme piping zijn verschillende sensortechnieken beproefd waaronder infraroodtechnologie (IR). Tijdens deze experimenten is gebleken dat met vlakdekkende infraroodmetingen het pipingproces nauwkeurig te volgen is. Het voordeel van deze techniek is dat hiermee vlakdekkende informatie wordt verkregen waaruit kan worden bepaald waar overmatige kwel of piping plaatsvindt of waar het risico op ontstaan van piping het grootst is. In de afgelopen jaren is deze techniek op verschillende waterkeringen toegepast waarmee het eventuele overmatige kwel- en pipingprobleem van de keringen in kaart is gebracht. Middels deze haalbaarheidsstudie zal worden onderzocht in hoeverre deze techniek in het algemeen geschikt is voor het beter en nauwkeuriger beoordelen van waterkeringen op piping. Hiervoor is een meetstrategie ontwikkeld die aansluit bij de nieuwe beoordelingsmethodiek. Met IR is snel en efficiënt van een groot gebied in kaart te brengen waar potentieel problematische kwellocaties zijn achter een waterkering. Met IR is een snelle inventarisatie te maken die gevolgd kan worden door nader onderzoek (geofysisch of geotechnisch) en zo nodig ook passende maatregelen – die heel gericht kunnen worden toegepast waarmee tijd en kosten worden gespaard en hinder tot het minimum beperkt blijft. Ook voor keringen die op basis van rekenmodellen zijn afgekeurd op het faalmechanisme piping kunnen IR metingen van toegevoegde waarde zijn om vast te stellen of bij een bepaald verhang over de kering ook daadwerkelijk de kwel-intensiteit toeneemt.

Inhoud

VOORWOORD	2
INHOUD	3
1. INLEIDING	5
1.1. AANLEIDING.....	5
1.2. DOELSTELLING	5
1.3. WAT IS EEN INFRAROODMETING?	6
2. TECHNISCHE ASPECTEN VAN INFRAROODMETINGEN BIJ DIJKEN	8
2.1. PLATFORMS	8
2.1.1. <i>Auto</i>	8
2.1.2. <i>Quad</i>	8
2.1.3. <i>Drone</i>	8
2.1.4. <i>Helikopter/vliegtuig</i>	9
2.1.5. <i>Satelliet</i>	10
2.2. INFRAROOD SENSOREN EN DATA PROCESSING.....	10
2.3. BESTAANDE VOORSCHRIFTEN EN RICHTLIJNEN	11
3. IR-METINGEN BIJ DIJKEN	12
3.1. TOEGEPASTE IR-METINGEN BIJ DIJKEN.....	12
3.2. AMSTERDAM-RIJNKANAAL (REGIONALE KERING)	13
3.3. POLDER HEERHUGOWAARD (REGIONALE KERING).....	15
3.4. LEENDERT DE BOERS POLDER (REGIONALE KERING, AFGEWAARDEERD)	16
3.5. OMMELANDERZEEDIJK (PRIMAIRE KERING)	17
3.6. EEMSKANAALDIJK (REGIONALE KERING).....	17
3.7. WADDENZEEDIJK AMELAND (PRIMAIRE KERING)	19
3.8. BOEZEMGEMAAL GOUDA (PRIMAIRE KERING).....	19
3.9. IJSSELDIJK BIJ WINDESHEIM	20
4. KOSTEN INFRAROODMETINGEN	21
5. MEETSTRATEGIE INFRAROODMETINGEN BIJ DIJKEN	22
5.1. WBI 2017	22
5.1.1. <i>Dijkvak-indeling</i>	23
5.1.2. <i>Eenvoudige toets</i>	24
5.1.3. <i>Gedetailleerde toets</i>	24
5.1.4. <i>Toets op maat</i>	24
5.2. HOOG WATER BESCHERMINGSPROGRAMMA	25
5.2.1. <i>Verificatie ontwerp</i>	26

5.3. ZORGPLICHT	26
6. CONCLUSIES & AANBEVELINGEN AAN DE POV-PIPING	27
6.1. CONCLUSIES	27
6.2. AANBEVELINGEN.....	27
7. BIBLIOGRAFIE.....	28
BIJLAGE 1 SCHEMA MEETSTRATEGIE IR.....	29

1. Inleiding

1.1. Aanleiding

In opdracht van de POV Piping ofwel Project Overstijgende Verkenning voor het faalmechanisme piping bij dijken is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd voor het toepassen van infraroodmetingen bij dijken. Binnen de POV Piping is een marktconsultatie uitgevoerd naar voor piping kansrijke technieken. Er zijn 60 ideeën ingebracht vanuit de markt die vervolgens zijn onderworpen aan een selectieprocedure. Eén van de als kansrijk geselecteerde systemen voor toepassing betreffen Infraroodmetingen om kwel en piping bij dijken te detecteren. Dit voorstel is ingebracht door Dijk Monitoring Nederland (DMN, een onderneming van Arcadis Nederland B.V. en InTech Dike Security Systems BV).

1.2. Doelstelling

In deze rapportage wordt de meerwaarde van toepassing van infraroodmetingen voor het faalmechanisme piping toegelicht. Daarnaast wordt hiermee een breder publiek geïnformeerd over de toepassingen van Infraroodmonitoring bij dijken en waterveiligheid. In dit rapport wordt gefocust op de toepassing van IR-metingen voor het faalmechanisme piping. Met infraroodmetingen kunnen onder andere kwellocaties worden gedetecteerd. Hiermee kunnen kwelgevoelige trajecten en dus mogelijk pipinggevoelige trajecten nauwkeuriger in kaart worden gebracht. Voor het opstellen van een meetstrategie of monitoringsstrategie voor IR-metingen bij dijken, zal worden aangegeven hoe deze metingen aansluiten bij de huidige werkwijze en beoordelingssystematiek.

Deze verkenning sluit aan bij doelstelling 1a van de POV Piping. Deze doelstelling is: de toepassing van rekenregels verbeteren en de toepasbaarheid van rekenregels vergroten. Het hoofddoel van de Haalbaarheidsstudie toepassingen Infraroodmonitoring dijken is als volgt geformuleerd:

Het bepalen en rapporteren van de toepasbaarheid van infraroodmetingen en het ontwikkelen van een toepasbare meetstrategie binnen de gangbare beoordeling- en bodemonderzoeksmethoden om de problematiek, opgave en onzekerheid rond dit faalmechanisme beter, betrouwbaarder en nauwkeuriger in kaart te brengen ten bate van de dijkversterkingsprojecten, de omvang en de stabiliteit van de programmering van het HWBP.

Infraroodmetingen kent een verscheidenheid aan toegevoegde waarden:

1. Een verbeterde manier voor waarnemen van kritieke locaties. Deze verbeterde manier van inspecteren verhoogt de objectiviteit van beoordeling van kritieke locaties. Hiermee wordt veel meer waargenomen dan wanneer enkel visuele inspectie wordt toegepast.
2. Infraroodscanning kan snel worden ingezet als aanvullende inspectiemethode bij hoogwater. Door meerdere metingen in de tijd kan de stroomsnelheid worden afgeleid. Hiermee kan een betere input gegenereerd worden voor geohydrologische modellen waarin bijvoorbeeld de stijghoogterespons wordt bepaald. Dit is weer input voor de analyse op piping. De snelheid van het water is bepalend voor het eventuele transport van zanddeeltjes die een pipe kunnen creëren.

Onder auspiciën van STOWA is de notitie 'Toekomstvisie inspectie en monitoring' opgesteld [oktober 2005]. In deze notitie worden de mogelijkheden van moderne monitoring aan dijken verkend en is een visie ontwikkeld van getrapte monitoring, van space born remote sensing tot in situ metingen. De visie was dat door toepassing van vlakdekkende metingen tot

gerichter in situ monitoring en bodemonderzoek overgegaan kan worden om zo vast te stellen waar zich zwakke plekken bevinden en hoe deze zich verhouden tot hun omgeving. Zo ontstaat een gedifferentieerd oordeel over de dijksterkte.

De in genoemde notitie voorgestelde aanpak wordt toegepast binnen deze haalbaarheidsstudie. Van belang is om de resultaten van de infraroodmetingen te kunnen valideren: is dit daadwerkelijk een pipinggevoelige plek, zijn er verschillen in sterkte c.q. pipinggevoeligheid te bepalen?

Er zijn verschillende platforms van waaraf metingen verricht kunnen worden. Een quick scan is uitgevoerd naar de toepasbaarheid van deze platforms, hun voor- en nadelen en de hierop te bevestigen type infraroodsensor. Daarbij is onder andere gebruik gemaakt van de STOWA-publicatie "Inspectiewijzers, 2012" en IJkdijk-rapportages. Daarnaast zijn er in de afgelopen jaren verkenningen uitgevoerd door Rijkswaterstaat en ook in België is een aantal verkenningen uitgevoerd naar de toepassing van infraroodmetingen op dijken.

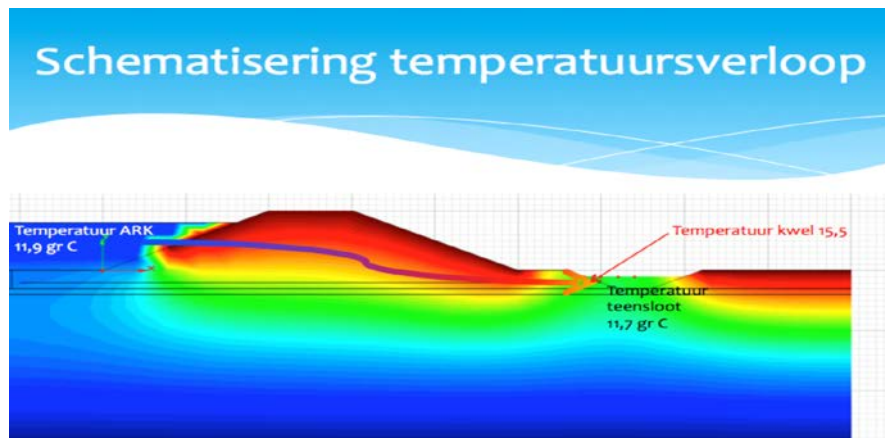
In deze rapportage worden de volgende punten behandeld:

- Bepalen hoe infraroodgegevens (waarnemingen) kunnen worden toegepast ter ondersteuning van de beoordeling en ontwerp op piping.
- Bepalen voor welke type locaties infraroodmetingen een waardevolle aanvulling bieden op de traditioneel toegepaste metingen en waarnemingen die gebruikt worden voor het bepalen van de pipinggevoeligheid van dijken (geotechnisch en geofysisch onderzoek). Hierbij is ook gebruik gemaakt van reeds ontwikkelde kennis in andere projecten.
- Bepalen op welke wijze opgedane kennis kan worden gedeeld en verspreid tussen de beheerders onderling. Hierbij wordt gedacht aan opleidingen, cursussen en publicaties in vakbladen. Het is de bedoeling aan te sluiten op de bestaande infrastructuur binnen het HWBP hiervoor. Hieraan wordt invulling gegeven in overleg met het IPM-team/de projectgroep van de POV-piping.
- Bepalen of infraroodmetingen kunnen worden ingezet als monitoringstechniek voor tussentijdse controle van doorlatendheid.

1.3. Wat is een infraroodmeting?

Met infraroodmetingen kunnen temperatuurverschillen zeer nauwkeurig vlakdekkend aan het oppervlak van de waterkering of in de teensloot gemeten worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van geavanceerde infraroodsensoren die temperatuurverschillen kunnen waarnemen van 0,05 graden met een infraroodsensor in het spectrum van 8 tot 14 μm .

Met het nauwkeurig meten van temperatuurverschillen kunnen kwelplekken in kaart worden gebracht doordat plekken waar overmatige kwel of lekkage plaatsvindt, een andere temperatuur zullen hebben dan hun omgeving. Een voorbeeld van een mogelijk verloop van de temperatuur in een waterkering en een mogelijke kwelplek die kan duiden op een pipinggevoelige locatie, is gevisualiseerd in een dwarsprofiel van een waterkering en weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Schematisering temperatuursverloop waterkering

In Figuur 1 is gevisualiseerd hoe de temperatuurverschillen bij overmatige kwel of piping kunnen verlopen. Deze visualisatie is gemaakt is door middel van een modelberekening ondersteund door metingen. Temperatuurverschillen in kwelwater ontstaan door warmte-uitwisseling van de bodem en kwelwater. In eerste instantie zal in de winter de kwelstroom worden opgewarmd door de hogere temperatuur van het dijklichaam. Naarmate de verblijftijd groter is, zal meer uitwisseling van temperatuur kunnen plaatsvinden. Op het moment dat de stroomsnelheid van de wel toeneemt, zal de temperatuur van het uitstromende water steeds meer afwijken van de temperatuur van het dijklichaam. Op basis hiervan kan de meest actieve wel (met het hoogste debiet) op de dijkstrekking worden bepaald. Door repeterende metingen kan de toename of afname van het kwelgedrag worden bepaald aan de hand van de variatie in temperatuur uitwisseling.

Aansluitend kan op de locatie waar de wellen en kwel gesignaleerd zijn aanvullende monitoring geïnstalleerd worden om verdere informatie in te winnen over stroomsnelheden, zoals peilbuismetingen of door het monitoren van het debiet van de wel. Door deze metingen onder verschillende belastingen in de tijd te herhalen, wordt meer inzicht verkregen in het kwelgedrag van de kering en het risico op het ontstaan van zandmeevoerende wellen. Deze informatie is tevens relevant bij het toetsen van de werking van kwelschermen van kunstwerken.

De verhouding van infraroodmetingen met andere geofysische meetmethoden wordt beschreven in de rapportage van de haalbaarheidsstudie naar geofysische karteringstechnieken voor piping, waar naast infraroodmetingen ook op andere geofysische opsporingmethoden wordt ingegaan.

2. Technische aspecten van infraroodmetingen bij dijken

De technische aspecten van infraroodmeting worden beschreven in twee onderdelen, het platform waar de infraroodsensor aan bevestigd wordt en de technische specificaties van de sensor.

2.1. Platforms

Er zijn verschillende platforms die gebruikt kunnen worden voor thermisch infraroodmetingen. De platforms die zijn meegenomen in deze haalbaarheidsstudie, zijn de auto, de drone, de helikopter of het vliegtuig en de satelliet.

2.1.1. Auto

Voor de infraroodmeting met de auto wordt de sensor met een mast op de auto bevestigd (Luijendijk, 2013; Wildemeersch, et al., 2014). De beste resultaten voor de meting worden verkregen door de camera zo loodrecht mogelijk op het oppervlak te richten. Hiervoor is de mast nodig. Er wordt gemeten door per locatie stilstaande beelden te maken van de zichtbare omgeving. Vervolgens wordt er naar het volgende stoppunt gereden.

De auto heeft meerdere voordelen (Wildemeersch, et al., 2014). Ten eerste biedt de auto een stabiel platform voor de mast waar de camera op bevestigd is. Een auto kan snel en effectief ingezet worden als de locatie berijdbaar is. Dit geldt voor een groot deel van de waterkeringen, waar een onderhoudsstrook op de kruin en/of in de berm aanwezig is. Vanwege het schuine talud dient de camera dat op juiste hoogte en kijk-hoek te worden afgesteld. Een schuifmast op het voertuig is in veel gevallen noodzakelijk. Bij het toepassen van de auto kan de camera direct aan de analyseapparatuur worden bevestigd, waardoor een eerste analyse al tijdens het rijden uitgevoerd kan worden. Dit biedt de mogelijkheid metingen direct visueel te valideren.

Voordeel hierbij is dat de veldploeg de mogelijkheid heeft om vanuit het meetvoertuig direct de beschikking te hebben over overige geotechnische data van de kering.

Een nadeel van een normale auto zijn beperkingen aan de berijdbaarheid en de bereikbaarheid van locaties waarvandaan gemeten moet worden. Normale auto's zijn niet geschikt om te rijden op onverharde terreindelen, daarom wordt voor het geval dat er onverharde terreindelen zijn, uitgegaan van het toepassen van een goede terreinwagen (4x4).

2.1.2. Quad

Een alternatief platform voor de auto is een quad. De quad is wendbaarder en lichter waardoor moeilijk begaanbare gebieden die niet met de auto bereden kunnen worden alsnog berijdbaar zijn en ingemeten kunnen worden.

Het grote voordeel is dat de quad minder afhankelijk is van de aanwezigheid van een verharde weg en beter geschikt is om op scheef terrein te rijden zoals een talud van een dijk. Het nadeel van de quad is de beperkte ruimte die de quad heeft voor een stabiele mast of voor analyseapparatuur. Zonder de analyseapparatuur kan er niet direct op hetzelfde moment een veldvalidatie uitgevoerd worden. Deze veldvalidaties verhogen juist de bruikbaarheid van de resultaten. Tevens is de snelheid voor een projectgebied waar situaties ver uit elkaar liggen met een quad laag in vergelijking met de auto.

2.1.3. Drone

Drones zijn een relatief eenvoudig alternatief om metingen vanuit de lucht mee uit te voeren. Waterschappen experimenteren met de toepassing van infrarood camera's onder drones (de

Zeeuw, 2016; Lemmers, 2016) evenals het Waterbouwkundig Laboratorium in Antwerpen (Wildemeersch, et al., 2014). De meest geschikte drones voor thermisch infraroodmetingen zijn een Quatrocopter of een Octocopter (Bakkenist & Flos, 2015) vanwege de stabiliteit van de drone. De drone maakt continu beelden die na de veldcampagne geanalyseerd worden. De drone heeft als groot voordeel dat deze niet afhankelijk is van de toegankelijkheid, bereikbaarheid en bereikbaarheid van de kering en het gebied. De drone kan overal meten ongeacht toegankelijkheid en begroeiing, mits juridisch toegestaan.

Het grootste bezwaar bij het gebruik van drones in Nederland is dat het juridisch complex is om toestemming te krijgen. In een groot deel van Nederland is het niet toegestaan om met drones te vliegen vanwege strikte beperkingen, zoals in de omgeving van vliegvelden. Het verkrijgen van de juiste vergunningen en ontheffingen maakt dat drones in Nederland (legaal) niet snel inzetbaar zijn. Daarnaast levert de regelgeving in Nederland veel beperkingen op. Binnen een straal van 150 meter van bebouwing en/of wegen mag niet met een drone gevlogen worden (Bakkenist & Flos, 2015). Bij veel dijken is een weg aanwezig of staan woningen of boerderijen in de omgeving. Tevens moet de drone te allen tijde in het zichtveld van de piloot aanwezig zijn. Door deze regelgeving wordt de snelheid van meten beperkt.

Verdere beperkingen betreffen de weersomstandigheden. De quatrocopter of octacopter kan vliegen tot windkracht 3. Bij een hoogwatersituatie met storm en harde wind kan een drone geen informatie inwinnen. Een ander nadeel is de mogelijke vluchtduur van de drone (Wildemeersch, et al., 2014). De drone heeft een beperkte vluchtduur afhankelijk van het type drone (kleine en middelgrote drones ca. 10 minuten afhankelijk van type en payload, grote (militaire) drones met brandstofmotoren maximaal 8 uur). Deze grote drones zijn relatief kostbaar (> €200 000) en worden in Nederland nog niet toegepast. Een ander nadeel is de beperkte draagcapaciteit van de drone, waardoor niet alle sensoren onder de drone kunnen worden bevestigd. De draagkracht is afhankelijk van de type drone.

2.1.4. Helikopter/vliegtuig

In het verleden zijn proeven gedaan in Nederland om de thermisch infraroodbeelden met een vliegtuig te maken (van Hemert, 2004). Vooral in Amerika worden thermisch infraroodbeelden gebruikt voor het opsporen van grondwaterlekage in kanalen (Majcher, Phelan, Lorah, & McGinty, 2007; Culbertson, Huntington, Caldwell, & O'Donnell, 2014) en lekkage van water uit irrigatiekanalen (Huang, Fipps, Maas, & Fletcher, 2009). Vanuit het vliegtuig worden continu beelden gemaakt die na de veldcampagne geanalyseerd worden. Het voordeel van het vliegtuig is de snelheid waarmee grote lengtes aan kering kunnen worden gemeten. In 12 minuten is 20 kilometer ingevlogen voor het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (van Hemert, 2004). Daarnaast heeft het vliegtuig toegang tot moeilijk begaanbaar gebied. Evenals voor de drone zijn er voor helikopter en vliegtuig ook locatie gerelateerde restricties in omgevingen van vliegvelden. Een voordeel ten opzichte van de drone is dat het vliegtuig in extremere weersomstandigheden ingezet kan worden (Simons & Droogers, 2016).

Nadelig zijn de hoge kosten van het inzetten van een bemand vliegtuig, dit geldt ook voor de inzet van een helikopter. Het is dus aantrekkelijk om eerst overige opties te verkennen voordat een vliegtuig wordt ingezet. Een tweede nadeel is het gebrek aan directe validatie in het veld met een helikopter/vliegtuig. Zonder directe validatie is de analyse op kantoor veel omvangrijker en moeten afwijkende plekken achteraf visueel geschouwd worden (Swart, 2007). Een ander nadeel is de resolutie van de meting uit het vliegtuig. De resolutie van de meting is voor een belangrijk deel afhankelijk van de camera (zie sectie 2.2). Door de grote hoogte waar op gevlogen wordt (>150 meter) is de benodigde resolutie van de camera hoger dan bij bijvoorbeeld een auto of drone. Op een hoogte van 500 meter is de gemeten resolutie, afhankelijk van de camera, ongeveer 135 bij 105 meter.

Voor een faalmechanisme op microschaal zoals piping wordt er op een dergelijke schaal veel detail gemist doordat de resolutie van camera's te beperkt is. Eventueel kan gebruik worden gemaakt van een ander objectief (lens) om de resolutie (meetpunten) per oppervlak hoger te krijgen.

2.1.5. Satelliet

Satellieten verzamelen allerlei informatie over het aardoppervlak, waaronder de temperatuur in het thermisch infrarode gebied (Simons & Droogers, 2016). De satellieten vliegen in een baan om de aarde. De baan bepaalt de frequentie waarmee ze over een gebied vliegen. Er zijn meerdere satellieten waarvan de ingewonnen data opgevraagd of ingekocht kan worden. Satellieten die thermisch infrarooddata verzamelen zijn de Landsat 8 (ITC, 2017), in 2020 wordt naar verwachting de opvolger Landsat 9 gelanceerd.

Voordeel van de satellietdata is de constante herhaling van thermische infrarood metingen. Tevens wordt de data van Landsat 8 gratis beschikbaar gemaakt door de NASA, waardoor relatief makkelijk data verzameld kan worden.

Grote nadeel van de Landsat 8 is de resolutie. De resolutie van de meting is 100 bij 100 meter. Een meting op microschaal is niet beschikbaar. Ook de opvolger Landsat 9 krijgt een infraroodcamera met een resolutie van 100 bij 100 meter. Dit betekent dat overmatige kwel bij keringen niet met deze satelliet te bepalen is. Een nadeel van satellieten is ook de inzetbaarheid. De satelliet kan niet op aanvraag over het gewenste gebied worden gestuurd, omdat deze in een vaste baan om de aarde zit.

2.2. Infrarood sensoren en data processing

Infraroodmetingen kennen tegenwoordig een steeds bredere toepassing. Hierdoor is er een grote verscheidenheid aan infraroodsensoren in de markt te verkrijgen. Nauwkeurigheid in temperatuur, resolutie, meetfrequentie, weersbestendigheid en de data-output zijn de grootste verschillen in deze sensoren. De prijzen van deze sensoren lopen dan ook sterk uiteen van enkele honderden Euro's tot meer dan honderdduizend Euro.

Voor IR-metingen bij dijken is het noodzakelijk te beschikken over een goede IR-sensor. Vanwege de zeer kleine temperatuurverschillen bij kwelstromen is het belangrijk dat de sensor een hoge nauwkeurigheid heeft en op temperatuur gekalibreerd is. Hiervoor dient de nauwkeurigheid minimaal 0,1 graden Celsius te zijn. Voor het meten wordt gebruik gemaakt van een speciale hoge-resolutie infraroodsensor welke meet in het spectrum van 8 tot 14 μm . Het aantal meetpunten waar temperatuur wordt gemeten bedraagt ongeveer 400.000, verdeeld over een oppervlakte waarvan de grootte afhankelijk is van de afstand vanwaar gemeten wordt en de gebruikte lens. Voor het detecteren van kleine kwelplekken dient minimaal 1 meetpunt per 0,0025 m² (5 x 5 cm) te worden aangehouden. Met een resolutie van 400.000 punten betekend dit een maximaal oppervlak van ongeveer 30 bij 30 meter per IR beeld.

Afhankelijk van de snelheid van voortbewegen is het noodzakelijk de opnamefrequentie hierop af te stemmen. In veel gevallen is 50 opnames per seconde mogelijk. Dit is in de meeste gevallen ook voldoende om een redelijke voortgangssnelheid mogelijk te maken. Daarnaast dient de sensor te worden geplaatst in een waterdichte behuizing zodat ook bij slechte weersomstandigheden kan worden gemeten. Deze behuizing mag geen nadelige invloed hebben op de temperatuurmeting en dient dus in de kalibratie te worden meegenomen. Normaliter worden IR-beelden weergegeven in grijs tinten. Echter vanwege de zeer kleine temperatuurverschillen in kwelstromen, zijn hiermee pipinggevoelige locaties niet te detecteren. De sensor zal dus afgestemd moeten worden op de temperatuursrange waarbinnen kwelstromen of piping zullen plaatsvinden.

Hiervoor zal de ruwe IR-data in het veld moeten worden bewerkt om tijdens het meten te beschikken over bruikbare IR-beelden waarop overmatige kwel- en pipinglocaties te vinden zijn. Daarnaast is het wenselijk om de IR-beelden te combineren met visuele opnames, zodat ook na dataprocessing temperatuurafwijkingen kunnen worden vergeleken met visuele opnames.

Voor opslag in een geo-database dienen de coördinaten (XY) van de opnames te worden vastgelegd. Voor vergelijking van repeterende metingen dienen naast de datum en het tijdstip ook de weersomstandigheden en de waterstanden (buitenwater en slootpeilen) te worden vastgelegd ten tijde van de opnames.

Voor het vertalen van de ruwe 16-bit data (infraroodintensiteit) naar werkelijke temperatuur wordt de sensor gekalibreerd. Voor het meten vanaf een voertuig is het van belang dat de sensor op de juiste hoogte wordt geplaatst om voldoende dekking te hebben op de taluds van de waterkering en onderliggende teensloot.

Extreme weersomstandigheden kunnen een negatieve invloed hebben op de IR-metingen. Tijdens hevige regenval zal het temperatuurbeeld vervagen. Daarnaast dient de hoek van de sensor op juiste wijze te worden afgesteld zodat zo min mogelijk reflectie van temperaturen optreedt.

Om vast te stellen waar overmatige kwel optreedt is het van belang om te weten wat de temperatuur van het water in en onder de kering zelf is (in de watervoerende zandlaag), wat de temperatuur van het buitenwater (de rivier) is en wat de temperatuur is van de (kwel)sloot of het polderpeil. Deze waarden zijn bepalend voor een goede interpretatie van de meting en om te bepalen of er overmatige kwel en/of piping plaatsvindt. De relaties tussen de temperaturen geven een indicatie van de verblijfstijd en daarmee temperatuursverandering van het kwellende water.

2.3. Bestaande voorschriften en richtlijnen

Voor het meten met IR-sensoren zijn geen richtlijnen opgesteld. Voor het verkrijgen van eenduidige meetresultaten van verschillende marktpartijen is het wenselijk voorschriften en richtlijnen op te stellen voor IR-metingen ten behoeve van het inventariseren van kwellocaties bij waterkeringen.

3. IR-metingen bij dijken

3.1. Toegepaste IR-metingen bij dijken

Om aan te geven wat de toepassingen van IR-metingen zijn bij dijken, wordt in deze paragraaf aan de hand van een aantal projecten aangegeven welke toepassingen er mogelijk zijn. Het toepassen van IR metingen bij primaire keringen is alleen zinvol als de waterstand hoog genoeg is voor het ontstaan van kwelstromen of opbarsten van de deklaag. IR-metingen leveren niet alleen voor primaire keringen maar ook voor regionale keringen extra informatie op waarmee het beter inzichtelijk kan worden gemaakt of er potentieel kwel- en/of pipinggevoelige locaties in de dijk aanwezig zijn.

De volgende projecten en behaalde resultaten worden hierna toegelicht:

1. Amsterdam-Rijnkanaal (categorie c-kering, afgewaardeerd naar regionale kering)
2. Polder Heerhugowaard (regionale kering)
3. Leendert de Boerspolder (regionale kering, afgewaardeerd)
4. Ommelander Zeedijk (primaire kering)
5. Eemskanaaldijk (regionale kering)
6. Waddenzeedijk Ameland (primaire kering)
7. Boezemgemaal Gouda (primaire kering)
8. IJsseldijk (primaire kering)

Een overzicht van de projectlocaties is weergegeven in Figuur 2



Figuur 2: Overzicht meetlocaties

3.2. Amsterdam-Rijnkanaal (regionale kering)

Het Amsterdam-Rijnkanaal was een categorie c-kering die is afgewaardeerd naar een regionale waterkering. In opdracht van Rijkswaterstaat is een groot deel van de waterkeringen langs het Amsterdam Rijnkanaal onderzocht met IR. In januari 2016 en in juni 2016 zijn door DMN infraroodmetingen uitgevoerd aan weerszijden van het Amsterdam-Rijnkanaal tussen Utrecht en Amsterdam. In Figuur 3 is te zien hoe een wel zichtbaar wordt bij een infraroodmeting. In het figuur is de meest actieve wel (oranje) zichtbaar die tijdens de metingen is aangetroffen in de teensloot aan de westelijke zijde van het Amsterdam Rijnkanaal.



Figuur 3; Na het vinden van de meest actieve wel wordt het debiet bepaald van het uitstromende kwelwater

De metingen langs het Amsterdams Rijnkanaal zijn uitgevoerd met behulp van een terreinwagen. Deze terreinwagen is voorzien van diverse computersystemen waarmee de infrarood data real-time kan worden bewerkt tot bruikbare informatie. Hiermee kunnen overmatige kwelplekken direct in het veld worden gevalideerd. Op onderstaande foto's is de terreinwagen waarmee de metingen zijn uitgevoerd weergegeven. In totaal is 60 kilometer waterkering in 1 dag gemeten.



Figuur 4 IR meting langs het Amsterdam Rijnkanaal Realtime data processing

Met IR-metingen is aangetoond dat er op diverse locaties langs de kanaaldijken van het Amsterdam-Rijnkanaal overmatige kwel optreedt. Volgens de beschikbare geotechnische informatie werd overmatige kwel meer in noordelijke richting verwacht vanwege een dunnere deklaag. Ter plaatse van de meest actieve wel zijn aanvullende metingen uitgevoerd (juli 2016). De wel is aanwezig in de teensloot aan de binnenzijde van de waterkering ter plaatse van dijkpaal 14/15. Naast extra infraroodmetingen zijn debietmetingen in de wel uitgevoerd om de hoeveelheid uitstromend water te bepalen en zijn er verschillende waterspanningsmeters geplaatst in de teensloot en het eerste watervoerend pakket.

Er is onderzoek uitgevoerd naar de invloed van de kwelstroming op de stabiliteit van de waterkering. Hierbij is gebruik gemaakt van reeds aanwezige ondergrondgegevens en geotechnische berekeningen. De wel heeft invloed op de waterspanningen en op de faalmechanismen piping en macrostabiliteit.

Ter plaatse van de meest actieve wel bij dijkpaal 14/15 zijn in eerste instantie metingen uitgevoerd waarbij het debiet, druk en temperatuur van het kwelwater zijn gemeten. Uit de waterspanningsmetingen in de onderliggende zandlaag bleek dat de invloed van scheepvaartverkeer in het Amsterdam Rijnkanaal direct meetbaar is.

Het debiet van de wel bleek relatief hoog en er is waargenomen dat veen vanuit de deklaag uitspoelde (erosie). De aanvullende informatie heeft niet geleid tot een ander toetsoordeel, de kering blijft goedgekeurd op piping, maar de extra informatie en inzichten geven wel een betere onderbouwing van de gekozen uitgangspunten en verkleint de onzekerheden hierin.

Op deze locatie was ook met bovenstaande metingen onduidelijk wat de resterende weerstand was van de nog aanwezige deklaag en of bij verdere erosie van de deklaag in de toekomst geen zand zou uitspoelen (piping). Om hier meer duidelijkheid in te verkrijgen is daarom een aanvullende proef uitgevoerd. Hierbij is in eerste instantie de deklaag volledig doorboord waarmee een open verbinding ontstond met een diameter van 10 cm in de deklaag tussen de kwelsloot en de onderliggende zandlaag. Na stabilisatie van de waterspanning in de zandlaag is beoordeeld of zanduitspoeling plaatsvond. Hierbij werd geen zanduitspoeling geconstateerd. Deze meting is uitgevoerd bij een normale waterstand waarbij het onduidelijk was of zanduitspoeling zou plaatsvinden onder maatgevende omstandigheden.

Om toch meer inzicht bij een vergroot verval te krijgen, is de waterstand ter plaatse van de wel (bij de doorboorde deklaag) met 40 cm verlaagd. Het debiet van het uitstromende water bleek uitzonderlijk hoog (ca 20 m³/h). Hierbij werd eveneens geen zanduitspoeling geconstateerd. Deze waarneming onderbouwt nogmaals de uitgangspunten en de analyse waarbij berekend was dat er geen piping zou optreden en vormt daarmee een goede onderbouwing van de analyse dat hier geen piping zal plaatsvinden onder maatgevende omstandigheden bij een volledig geërodeerde deklaag. Aansluitend is de doorboorde deklaag hersteld met zwelklei en is de afdichting gecontroleerd op lekkage middels infraroodmetingen. Bij deze meting werd geconstateerd dat de afdichting voldoende was.

Conclusie: De waterkering is in de toetsing afgekeurd op het mechanisme 'macrostabiliteit' en goedgekeurd op 'piping'. De IR-metingen detecteerden overmatige kwel door opbarsten van de deklaag op andere plekken dan dat op basis van de geotechnische gegevens werd verwacht.

Hiermee is aangetoond dat vlakdekkende IR-metingen aanvullende informatie leveren voor het bepalen van kwelgevoelige locaties. Deze informatie is van meerwaarde voor de keuzes van vakken en het schematiseren van de faalmechanismen opbarsten en opdrijven en piping en macrostabiliteit. In dit specifiek geval wijzigt het toetsoordeel niet na een nadere beschouwing van de IR-meetresultaten uit 2016 en de aanvullende metingen ter plaatse van de meest actieve wel. De waterkering blijft goedgekeurd op het faalmechanisme piping.

Doordat het optreden van een heave situatie op basis van het verval over de deklaag kan worden uitgesloten, zal er geen zand worden geërodeerd vanuit de onderliggende zandlaag. In de rapportage wordt aangeraden om de vraag van Rijkswaterstaat “resulteert de wel in een stabiliteitsprobleem?” voor deze locatie specifiek nog dieper uit te werken en verder te onderzoeken gezien het oordeel op macrostabiliteit onvoldoende is. De IR-metingen tezamen met aanvullende metingen hebben voor deze locatie bruikbare informatie opgeleverd in de verschillende toets-stappen volgens de beoordelingssystematiek (dijkvak-indeling, eenvoudige toets, gedetailleerde toets en toets op maat).

3.3. Polder Heerhugowaard (regionale kering)

In opdracht van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier zijn infraroodmetingen uitgevoerd voor het verzamelen van meer informatie over natte plekken in de berm van de dijk van de polder Heerhugowaard. Deze natte plekken worden zowel in natte als droge perioden waargenomen. De locaties van de natte plekken zijn nader onderzocht door het uitvoeren van infraroodmetingen in het natte seizoen, in januari van 2015 en in de zomer is een tweede meetrone uitgevoerd, op 5 juni 2015. Het betreft hier specifiek de dijkkring aan de zuidzijde van de polder en de dijkkring aan de noordwestzijde. De metingen tonen verschillende kwelplekken. In Figuur 5 is een weergave opgenomen van de resultaten voor één van de kwelplekken.



Figuur 5 Weergave infraroodmetingen ter plaatse van een kwelplek aan de polder Heerhugowaard

Op bovenstaande afbeelding is een duidelijke kwelplek in de naastgelegen sloot waargenomen. Op verschillende plekken langs het dijktraject zijn soortgelijke waarnemingen die duiden op kwel van water. Locaties waar kwelwater in de sloot of op het talud is geconstateerd, zijn in rood op de satelliefoto aangegeven. Bij de groene punten zijn geen bijzonderheden waargenomen. In januari 2015 zijn de metingen uitgevoerd in een relatief natte periode. In juni 2015 zijn de metingen uitgevoerd in een relatief droge periode.

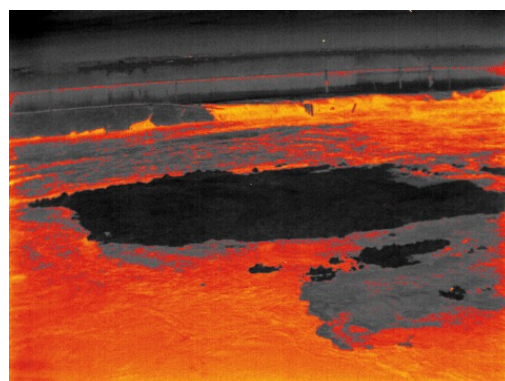
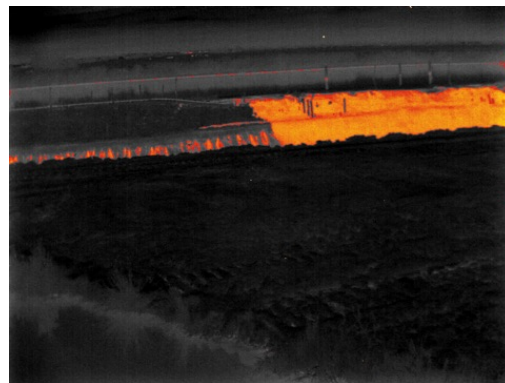
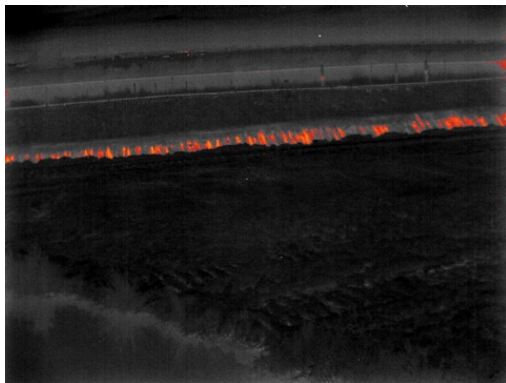
Het verschil tussen beide metingen is aanzienlijk. Daar waar in januari nog overmatige kwelplekken zijn geconstateerd, blijken deze in juni volledig te zijn opgedroogd.

Conclusie: Het uitvoeren van infraroodmetingen in zowel natte als droge perioden (monitoring) levert onafhankelijke waarnemingen van locaties waar natte plekken optreden. Door deze metingen bij verschillende weersomstandigheden uit te voeren is meer inzicht verkregen in de kwelplekken in de polder Heerhugowaard. Door het meten met infrarood metingen onder verschillende weersomstandigheden is voorts meer inzicht verkregen in de oorzaak van de kwel plekken. Bij de polder Heerhugowaard is gebleken dat de kwelplekken niet worden veroorzaakt door kortsluiting en een hoge druk vanuit het zandpakket onder de dijk, maar door kwelstromen door het veen in de dijk of bij aanwezigheid van een zandcunet.

3.4. Leendert de Boers Polder (regionale kering, afgewaardeerd)

Bij de Leendert de Boerspolder (LdB) is een bezwijkproef uitgevoerd. De resultaten van deze bezwijkproef worden gebruikt in het lopende onderzoek naar de sterkte van een kleidijk op veen bij extreme belasting. De stresstest geeft niet alleen inzicht in het gedrag van de beproefde waterkering zelf, maar de resultaten kunnen ook gebruikt worden bij vergelijkbare dijktrajecten. Daarnaast kunnen de resultaten van dit soort belastingproeven of stresstesten worden gebruikt in crisisbeheersing.

Bij deze LdB-proef zijn infraroodmetingen uitgevoerd vanaf een mast nabij een compartimenteringsdijk. Uit de test blijkt dat met behulp van monitoringstechnieken verzakkingen van de dijk (macro-instabiliteit) en ontwikkelingen in waterspanningen in en onder de dijk konden worden gemonitord. Inmiddels worden de beproefde technieken toegepast in verschillende LiveDijken in Nederland en is Stichting FloodControl IJkdijk gestart met de ontwikkeling van het Dijk Data Service Centrum (DDSC) om alle data afkomstig van de gebruikte technieken op te slaan. Onderstaand de IR-beelden bij doorbraak.



De doorbraak vond plaats in het donker. De kwelplekken en deformatie van de kering was goed zichtbaar in de IR-beelden.

Conclusie: Uit de metingen van deze bezwijkproef is door infraroodmetingen geen inzicht verkregen in beweging of het verloop van de freatische lijn, maar wel in de locaties waar vocht kan uittreden (kwel) ofwel de techniek geeft een indicatie van zwakke(re) plekken in de dijk voorafgaand aan het moment van falen, hetgeen bruikbare informatie vormt voor de bewaking van de dijkveiligheid.

3.5. Ommelanderzeedijk (primaire kering)

Bij de Ommelanderzeedijk is een infiltratieproef uitgevoerd waarbij water geïnfiltreerd is in de dijk door toepassing van het Dijk Monitorings en Conditionerings-systeem (DMC), waarmee de gevolgen van infiltratie bepaald zijn. De werkzaamheden zijn uitgevoerd als onderdeel van het project LiveDijk XL Noorderzijlvest. De Ommelanderzeedijk en de Lauwersmeerdijk worden sinds 2012 over 14 kilometer real-time gemeten met een monitoringssysteem. De doelstelling van het project was het verkrijgen van inzicht in micro- en macro-(in)stabiliteit van de dijk en kleibekleding op de zanddijk en het testen van de DMC-buis voor full-scale toepassingen, door middel van diverse typen infiltratietesten het testen van een dijk in functie. Als onderdeel hiervan zijn infraroodmetingen uitgevoerd. De infraroodbeelden geven informatie over het gehele dijktraject, naast de aanvullende informatie uit peilbuisraaien die slechts op één raai informatie geven.

De waterstand in de dijk is gemeten in één raai, waardoor dit slechts informatie geeft voor een gedeelte van het traject waarover geïnfiltreerd is. De IR-beelden geven echter informatie over de aanwezigheid van mogelijke kwelplekken over het gehele dijktraject. De locaties waar overmatige kwel optrad zijn duidelijk te zien in de IR-beelden.

Conclusie: Het onderzoek heeft aangetoond dat het infraroodsysteem onder verschillende omstandigheden goed heeft gefunctioneerd. Een aantal kwelplekken die tijdens de nulmeting waren gesignaleerd, zijn tijdens de proef uitgegroeid tot zandmeevoerde wellen. Door het gebruik van verschillende manieren van inspectie, waaronder infrarood, en de snelle communicatiewijze was het te allen tijde duidelijk wat de conditie van de dijk was. Om vertrouwen te krijgen in meetresultaten is het van belang om de situatie ter plekke te zien. Dit is gedaan door visuele inspectie.

3.6. Eemskanaaldijk (Regionale kering)

In januari 2012 tijdens het hoge water in het Eemskanaal zijn door de luchtmacht vanuit een F16 de Eemsdijk geïnspecteerd waarbij infrarood metingen zijn uitgevoerd. Het bleek op dat moment lastig om de meetdata snel te kunnen analyseren. Enkele dagen na deze vlucht werden de resultaten van de meting vrijgegeven. De resultaten van de meting bleken niet bruikbaar voor detectie van overmatige kwel of piping. Onderstaande een IR beeld vanuit de F16. Mogelijk was de afstand te hoog en de resolutie te laag. Daarnaast is het onduidelijk hoe de data geïnterpreteerd is.



In de periode van januari tot maart 2017 zijn infraroodmetingen uitgevoerd aan de noordelijke kering van het Eemskanaal tussen Groningen en Delfzijl. De metingen hadden tot doel meer inzicht te verkrijgen in de oorzaak van kwel/lekkage aan het binnentalud van de kering daar het vermoeden bestaat dat de aanwezige damwand lekt. Hiervoor zijn vanaf het land infraroodmetingen uitgevoerd waarmee alle lekkageplekken in beeld zijn gebracht. Daarnaast zijn met een 3D-laserscanner in combinatie met 360 graden foto's alle lekkende ankers en damwanden in beeld gebracht. Tevens is op drie plekken de elektrische geleidbaarheid gemeten.

Tijdens deze metingen is op verschillende plekken uittredend water op het binnentalud middels infrarood gedetecteerd. Een aantal natte plekken in het talud gaven echter geen andere temperatuur dan het maaiveld. Met behulp van IR kon onderscheid worden gemaakt tussen "geïsoleerd water" (natte plekken in rijsporen) en actieve lekkages van de kering. Deze geconstateerde lekkages bleken direct verband te hebben met lekkages van de ankerstoelen van de damwand. Ook zijn in de naastgelegen kwelsloot een aantal wellen geconstateerd. In Figuur 6 is een wel weergegeven en is tevens hoger in het talud een natte plek te zien die veroorzaakt wordt door lekkage van de ankerstoelen.



Figuur 6: Wel bij Eemskanaal

Conclusie: met de infraroodmetingen zijn kwellocaties en lekkages geïdentificeerd. Bij de vergelijking van infraroodresultaten en bekende geconstateerde damwandlekkage blijkt een duidelijk verband aanwezig te zijn tussen de waarnemingen. Ter plaatse van de oude betonnen/houten planken is op verschillende plekken uittredend water op het binnentalud geconstateerd. Op een aantal plekken is ook uittredend water op het binnentalud geconstateerd, terwijl geen lekkage aan de damwand is vastgesteld. Dit duidt mogelijk op andere oorzaken van lekkage (bijvoorbeeld onderloopsheid of de aanwezigheid van kruisende leidingen/zinkers) die nader onderzocht moeten worden.

3.7. Waddenzeedijk Ameland (primaire kering)

Tijdens de tweede toetsronde is een deel van de Waddenzeedijk op Ameland afgekeurd op het faalmechanisme piping. In verband hiermee zijn maatregelen uitgewerkt om de dijkstrekking te versterken. Gezien de omvang en kosten van de te nemen maatregelen was de wens van het waterschap om overmatige kwel en/of piping te laten monitoren teneinde de maatregelen beter te kunnen specificeren. Hiervoor zijn onder andere aanvullende infraroodmetingen uitgevoerd als onderdeel van een door Deltares (2013) opgesteld monitoringsplan (2013, 1206727-000-GEO-0003-r-Monitoringsplan). Op basis van dit monitoringsplan is een aantal meetraaien met waterspanningsmeters geplaatst en zijn door InTech drie vlakdekkende infraroodmetingen uitgevoerd. Deze metingen zijn uitgevoerd op de volgende momenten:

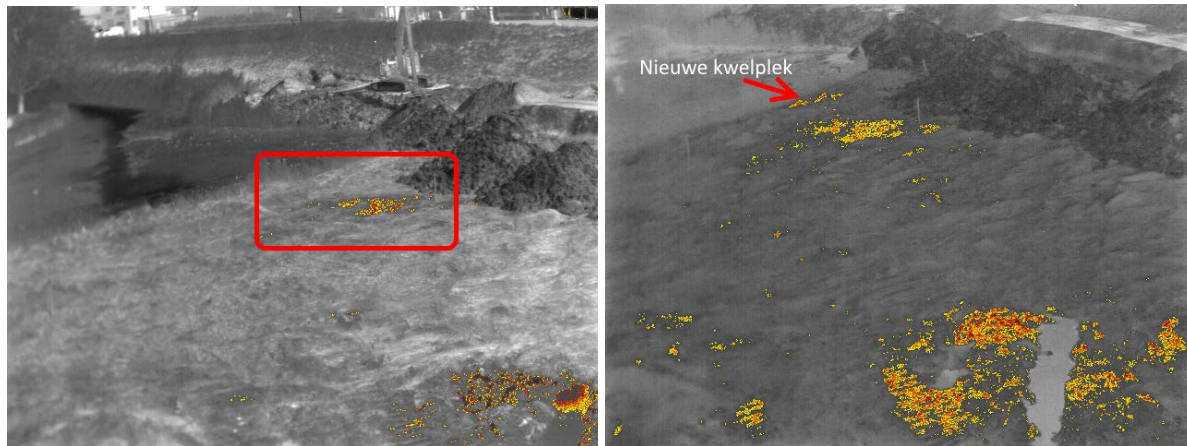
- 1) tijdens een getijdencyclus in maart 2013 (gemiddeld “natte” omstandigheden);
- 2) tijdens een noordwesterstorm in stormseizoen 2013/2014 (vrij extreme omstandigheden, ook bekend geraakt als de Sint Nicolaasstorm van 2013);
- 3) meting tijdens een getijdencyclus in juni 2014 (gemiddeld “droge” omstandigheden).

De meetresultaten van alle drie de metingen zijn beoordeeld op detectie van overmatige kwel en/of piping. Tijdens alle drie de meetrondes zijn geen locaties waargenomen waar kwel, laat staan overmatige kwel optrad en die zouden duiden op het risico van het ontstaan van piping. Deze resultaten liggen in lijn met de resultaten van de stijghoogtemetingen die zijn uitgevoerd. Ook deze meetwaarden gaven geen aanleiding dat piping zou kunnen voorkomen. Tijdens de metingen op 5 december 2013 en op 10 januari 2015 werden door de dijkbeheerder visuele inspecties uitgevoerd. Ook tijdens deze visuele inspecties zijn geen afwijkingen geconstateerd.

Conclusie: Op basis van de gecombineerde informatie, namelijk infraroodmetingen, peilbuismetingen, waarnemingen door de beheerder en ijking met een 3D-stromingsmodel, is naar voren gekomen dat er geen overmatige kwel en/of piping heeft plaatsgevonden tijdens de bovengenoemde omstandigheden. De infraroodmetingen droegen informatie bij om tot een oordeel voor piping te komen.

3.8. Boezemgemaal Gouda (Primaire kering)

In juli 2017 zijn in opdracht van het Hoogheemraadschap van Rijnland infraroodmetingen uitgevoerd aan de Schielands Hoge Zeedijk aan de Hollandse IJssel ter hoogte van het boezemgemaal Gouda. Aanleiding voor deze meting was het vermoeden van lekkage van de kering ter hoogte van het gemaal. Het doel van de meting was het vaststellen van verschillen in kwelstromen bij hoog en laag water aan de hand van infraroodmetingen in combinatie met handmatige temperatuurmetingen. Op deze locatie is een pipingberm aangebracht. De meting vond plaats vlak voor de aanleg van de pipingberm. Hiervoor is er zowel bij hoogwater als bij laagwater gemeten. In Figuur 7 zijn beide situaties weergegeven.



Figuur 7: Kwel bij hoog water

Kwel bij laag water

Bij hoogwater zijn de natte plekken groter geworden en is de grond aanzienlijk drassiger. Dit is duidelijk te zien op de infraroodbeelden. Een duidelijk verschil tussen de situaties bij laag en hoog water zijn de kwelplekken langs de sloot. Deze waren niet te zien bij laagwater maar duidelijk te zien bij hoogwater. De kwelplekken langs de sloot waren niet met het blote oog zichtbaar aangezien deze zich in de rietkraag bevinden. De temperatuur in deze kwelplekken is gevalideerd met handmatige temperatuurmetingen.

Conclusie: Op basis van IR-metingen zijn kwelplekken vastgesteld die in eerste instantie niet met het blote oog te detecteren zijn. Tevens is vastgesteld dat de kwelintensiteit hoger wordt naarmate het water stijgt. Er is na aanleg van de pipingberm nog geen herhaalde meting geweest. Een tweede meting zou de beheerder inzicht kunnen geven in het effect van de pipingberm.

3.9. IJsseldijk bij Windesheim

Op 1 maart 2016 zijn metingen verricht ter plaatse van de IJsseldijk bij Windesheim. Op 1 maart 2016 was sprake van hoog water in de IJssel waarbij zandmeevoerende wellen werden geconstateerd. Tijdens de meting werden verschillende zandmeevoerende wellen gedetecteerd. Op basis van temperatuurverschillen kon onderscheid worden gemaakt in activiteit van de wellen op basis van temperatuurverschillen. De temperatuur van het uitstromende water van de meest actieve zandmeevoerende wel was lager dan dat van de minder actieve wellen. Na afloop van de metingen bleek de vierwielaandrijving van de terreinwagen niet goed te functioneren waardoor deze vast kwam te zitten in de klei. Na herstel kon de terreinwagen het terrein verlaten.

Conclusie: Tijdens de meting op 1 maart 2016 werden zandmeevoerende wellen geconstateerd in de teensloot van de IJsseldijk bij Windesheim. Op basis van temperatuurmetingen kon onderscheid worden gemaakt in meest actieve zandmeevoerende wellen en minder actieve wellen waar nog geen zandtransport plaatsvond.

Gebleken is dat een goed functionerende vierwielaandrijving noodzakelijk is om metingen te verrichten op (drassige) onverharde terreindelen.

4. Kosten infraroodmetingen

De kosten voor het inwinnen van infrarood metingen, de bijbehorende data processing en de analyse naar het vóórkomen van kwelplekken / piping ligt globaal tussen € 200,- per kilometer en € 1.000,- euro per kilometer. Hierbij wordt standaard uitgegaan van de toepassing de auto als platform. Voor de bepaling van de kosten zijn de volgende factoren van belang zijn:

- de lengte van het te meten traject (minimaal 5 km, maximaal 60 km/dag);
- de bereikbaarheid van de locatie;
- meten vanaf verhard oppervlak of ruw terrein;
- de tijdsduur waarover moet worden gemeten;
- het tijdstip waarop moet worden gemeten (doordeweeks overdag of ook nacht en in het weekend);
- vertaling naar waterveiligheidsrisico's (inzet geo-experts en waterveiligheidsspecialisten);
- verrichten van ad hoc metingen tijdens calamiteiten;
- benodigde inzet van geotechnische expertise voor vertaling van de infraroodmeting naar beoordeling van stabiliteit en risico van falen.

Met name de benodigde inzet voor geotechnische- en geofysische expertise is lastig vooraf te bepalen en afhankelijk van beschikbare data en informatie. Uitgaande van een gemiddelde van 40 kilometer per dag op een goed begaanbare kering bedragen de kosten ongeveer € 300,- per km (inclusief dataverwerking).

5. Meetstrategie infraroodmetingen bij dijken

In Nederland zijn bij de laatste toetsronde veel waterkeringen afgekeurd op het faalmechanisme piping. Vanwege het ontbreken van voldoende informatie is het voor veel dijkvakken onduidelijk of bij een hoge waterstand ook daadwerkelijk piping optreedt. Hiervoor dient meer inzicht te worden verkregen in de ondergrond en het kwelgedrag van de kering bij een hoge waterstand.

Op basis van reeds uitgevoerde projecten is duidelijk naar voren gekomen dat infraroodmetingen informatie verschaffen over locaties waar wellen optreden. Deze informatie kan op verschillende momenten in het beheerproces van een waterkering worden gebruikt:

Als informatie bron in de voorbereiding van een beoordeling of ontwerp

- Als een van de informatiebronnen bij de beoordeling van de veiligheid (toetsing van regionale keringen of WBI voor primaire keringen) of opstellen van een ontwerp;
- Als onderdeel van een grondonderzoeksstrategie.
 - IR metingen gebruiken om het grondonderzoeksplan op te stellen of te verfijnen, eventueel in combinatie met geofysische karteringstechnieken.
 - Lokale zwakke plekken (kwellocaties) nader onderzoeken om de geohydrologische situatie beter in beeld te krijgen en zo een betere beoordeling van piping te kunnen geven. Hiermee kan ook een geoptimaliseerd ontwerp worden opgesteld.

Als hulpmiddel bij inspecties

- Als monitoringsmiddel voor het toezichthouden tijdens de uitvoering als er bijvoorbeeld ontgraven wordt.
- Als informatiebron over de staat van de waterkering in de huidige situatie onder dagelijkse omstandigheden (zorgplicht).

Sinds 1 januari 2017 is de nieuwe Waterwet van kracht. In deze nieuwe wet is de wettelijke toetsronde vervangen voor het Wettelijke Beoordelingsinstrumentarium (WBI). Deze vernieuwde manier van beoordelen van waterkeringen op stabiliteit kent drie verschillende beoordelingsstappen. Voor het bepalen van de meetstrategie voor infraroodmetingen wordt in dit hoofdstuk per beoordelingsstap aangegeven welke meerwaarde infraroodmetingen kunnen hebben.

In de komende jaren zullen vele honderden kilometers aan keringen worden versterkt vanuit het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Ook voor deze keringen zouden aanvullende IR-metingen een toegevoegde waarde kunnen hebben.

Vanaf 1 januari 2017 is ook de zorgplicht ingegaan. Ook vanuit het perspectief van de zorgplicht zullen infraroodmetingen een toegevoegde waarde hebben. In dit hoofdstuk zijn meetstrategieën Infrarood voor de onderstaande toepassingen nader uitgewerkt.

- 1) WBI 2017
- 2) Versterkingsopgave HWBP
- 3) Zorgplicht

5.1. WBI 2017

De nieuwe beoordelingsmethodiek kent verschillende stappen waarin het beoordelingsproces plaatsvindt. Onderstaand is per stap aangegeven waar IR-metingen een toegevoegde waarde zullen hebben.

5.1.1. Dijkvak-indeling

Voor zowel bij het toetsen als bij het beoordelen (maar ook bij het ontwerpen) is één van de eerste stappen die wordt uitgevoerd door de “toetsers” of “beoordelaars” het opstellen van een vak-indeling. De procedure van de WBI 2017 en van de Leidraad Toetsen op Veiligheid Regionale Waterkeringen bestaat uit een eenvoudige toets, een gedetailleerde toets en een toets op maat.

De eerste stap bestaat uit het vastleggen van de ligging van de waterkering, het verzamelen van data en informatie van de waterkering en de ondergrond. Op basis van deze gegevens wordt een dijkvak-indeling gemaakt.

De dijkvakindeling wordt gemaakt op basis van verschillende databronnen, de meest belangrijke aspecten voor het opstellen van een dijkvak op sterkte:

- ligging en oriëntatie
- geometrie
- ondergrond en opbouw van de dijk;
- het verloop van waterstanden en waterdrukken over de dijk
- waarnemingen van onder andere wellen, natte plekken en schades aan de dijk
- historische data of bestek en revisie gegevens van eerdere dijkversterkingen.

Infraroodmetingen geven informatie over (in)homogeniteit van de ondergrond en leveren naast peilbuismetingen informatie over waterstanden en waterdrukken en mogelijke kwellocaties. Belangrijk is dat infraroodmetingen objectieve waarnemingen leveren van kwellocaties. Door het uitvoeren van vlakdekkende metingen over trajecten waar kwelplekken optreden, kan deze informatie gebruikt worden om de dijkvak-indeling aan te scherpen. Zo kan de beoordelaar keuzes maken op gebieden of dijkstrekking waar geen natte plekken of wellen voorkomen, en waar wel natte plekken of wellen voorkomen (mogelijk ook naar hoge en lagere intensiteit wellen).

Op basis van de locaties en ligging van wellen gecombineerd met de informatie die al beschikbaar is uit eerder uitgevoerd grondonderzoek en historische gegevens, kan het grondonderzoeksplan veel explicieter en gericht worden uitgewerkt, zoals:

- De locaties van het grondonderzoek specificeren op basis van de infraroodmetingen zodat er onderzocht kan worden of er lokale verschillen zijn tussen de ondergrond ter plaatse van de wellen en de locaties ernaast waar geen wellen optreden (schaalgrootte en heterogeniteit).
- Op basis van de IR-gegevens kunnen gericht keuzes worden gemaakt waar peilbuismetingen uitgevoerd kunnen worden in (een dwarsraai op) de waterkering.
- Vlakdekkende metingen van de deklaag laten uitvoeren voor het bepalen van kritische opbarst of opdrijf locaties en het uitwerken van een langere termijn monitoring met infraroodmetingen tijdens verschillende natte omstandigheden, hoger water en zo mogelijke een zeer hoog water zodat de extrapolatie naar extreem hoogwater beter gemodelleerd kan worden.

Van belang bij het uitvoeren van infraroodmetingen is het vaststellen en vastleggen van de weersomstandigheden ten tijde van de metingen en de waterstanden die op dat moment aanwezig waren (laag, gemiddeld, hoog water, tijdens een storm). Het waarnemen van kwelplekken en de oorzaak van het optreden van kwel is gerelateerd aan de geohydrologie en de bodemgesteldheid. Om meer inzicht te krijgen is het waardevol om onder verschillende omstandigheden te weten of op dezelfde locaties kwel of wellen ontstaan.

Deze waarnemingen in de tijd kunnen vervolgens worden gebruikt om de invoerparameters en het geohydrologisch model te ijken aan de waarnemingen.

Met de dijkvak-indeling beoogt men homogene dijkvakken te creëren om de kering op stabiliteit te kunnen beoordelen. Hierbij gaat men uit van een bepaalde homogeniteit van de opbouw van de kering en de ondergrond. Met behulp van vlakdekkende infraroodmetingen kan bij bepaalde waterstanden worden gecontroleerd of het kwelgedrag in een bepaald dijkvak gelijk is of aanzienlijk afwijkt van de rest van het vak. Indien blijkt dat het kwelgedrag binnen een (homogeen) dijkvak lokaal aanzienlijk afwijkt, zou dit aanleiding kunnen zijn om de dijkvak-indeling te herzien.

5.1.2. Eenvoudige toets

De eerste stap in het beoordelingsproces is de eenvoudige toets. Indien er geen aanleiding is voor piping kan in principe het beoordelingsproces voor piping in de eerste stap worden afgerond. Indien wel aanleiding is voor piping gaat men door naar de tweede beoordelingsstap. In de eerste beoordelingsstap hebben infraroodmetingen dus in principe geen toegevoegde waarde.

5.1.3. Gedetailleerde toets

De tweede stap in de beoordeling is de gedetailleerde toets. Bij de tweede stap wordt op basis van het (verwachte) intrede- en uittredepunt de kwelweglengte bepaald. Met behulp van infraroodmetingen kunnen in het veld de (mogelijke) uittredepunten worden bepaald. Op basis van het temperatuurverval over de kering kan een indruk worden verkregen in de werkelijke kwelengte, met name indien het voorland mee is genomen in de totale kwelengte. Ook voor waterkeringen geldt de uitdrukking “een ketting is zo sterk als de zwakste schakel”. Het is dus van belang om bij de beoordeling rekening te houden met het punt waar zich de hoogste kwelintensiteit bevindt. Met IR-metingen in combinatie met aanvullende veldmetingen (zoals met de wel-monitor) kan inzicht worden verkregen in het zwakste gedeelte van het dijkvak waar het grootste risico op falen van de kering als gevolg van piping bestaat. De stabiliteit van de kering dient gewaarborgd te zijn onder maatgevende omstandigheden. Doordat maatgevend hoogwater zeer zelden voorkomt is een enkele meting met IR bij kwelplekken onvoldoende om hierover een uitspraak te kunnen doen. Indien herhalingsmetingen onder verschillende omstandigheden worden uitgevoerd kan meer inzicht worden verkregen in het kwelgedrag onder maatgevende omstandigheden. Als ook deze repeterende metingen en aanvullende metingen en analyses van de waterstanden nog onvoldoende inzicht verschaffen in het risico van falen van de kering door piping, dient de derde beoordelingsstap “toets op maat” te worden verricht.

5.1.4. Toets op maat

De derde stap in het beoordelingsproces is de toets op maat. Een dijkstrekking met een verhoogde kwelintensiteit met een risico op het ontstaan van piping hoeft niet per definitie te bezwijken op het faalmechanisme piping. Om te bepalen in hoeverre de kering daadwerkelijk gevoelig is voor piping en nader onderzoek tot meer inzicht kan leiden. Een toets op maat zal per dijkvak verschillen. Een goed voorbeeld van een “toets op maat” zijn de reeds eerder uitgevoerde “stress-testen” van Stichting FloodControl IJkdijk. Hierbij worden maatgevende omstandigheden nagebootst en wordt het gedrag van de kering uitvoerig gemonitord. IR-metingen hebben hierin al hun toegevoegde waarde bewezen.

In onderstaand schema is de meetstrategie IR bij dijken samengevat. Een grotere versie van dit schema is te vinden in Bijlage 1.

Beoordelingsstappen	IR metingen	Resultaat
dijkvak indeling	Meten van dijkstrekkings en bepalen kwelgedrag per dijkvak onder verschillende omstandigheden	- geen afwijkingen kwelgedrag binnen 1 dijkvak -> vakindeling juist gekozen - wel afwijkingen binnen 1 dijkvak -> oorzaak hiervan bepalen (heterogeniteit?) vakindeling herzien
Eenvoudige toets	Geen metingen	- geen toegevoegde waarde
Gedetailleerde toets	- Controle op kwelgedrag - Bepalen zwakste punt (piping) - herhalingsmetingen - controle op intrede en uitrede punt - eventueel repeterende metingen	- bepalen of kwelgedrag stabiel is - bepalen kwel-intensiteit en vertaalslag naar rekenmodellen - vertaalslag naar maatgevende omstandigheden - inzicht in intrede en uitrede punt
Toets op maat	- metingen tijdens stress test om kwelgedrag te volgen - hierbij zal IR een onderdeel zijn van een	- bepalen daadwerkelijke stabiliteit kering onder maatgevende omstandigheden - bepalen verval over kering waarbij zandtransport (piping) plaatsvindt

5.2. Hoog Water Beschermingsprogramma

De versterkingsopgave van het HWBP is een meerjarig programma en loopt tot 2024.

Een dijkversterking kent ook verschillende stappen. Bijvoorbeeld nadere analyse veiligheid tijdens de stappen VKA, VO, DO, UO en realisatie.

Voor verschillende keringen zijn inmiddels aanvullende metingen verricht om beter inzicht te verkrijgen in de werkelijke stabiliteit van de kering. Zo zijn bijvoorbeeld verschillende metingen uitgevoerd met grondradar om meer inzicht te verkrijgen in mogelijke intredepunten voor piping. De verwachting is dat door middel van het verzamelen van meer informatie de omvang van de versterkingsopgave kan worden verkleind. Daarnaast zullen aanvullende metingen en inzichten een mogelijk ingreep kunnen verkleinen. Uit de in hoofdstuk 3 beschreven projecten blijkt dat IR-metingen bij dijken een toegevoegde waarde heeft en extra informatie oplevert. De verwachting is dat IR-metingen ook voor het HWBP een toegevoegde waarde zullen hebben indien jaarlijks, of bij hoog water, de afgekeurde dijkvakken worden gemeten met IR. Door het regelmatig inwinnen van IR-data van keringen zal beter inzicht worden verkregen in het kwelgedrag van de kering onder verschillende omstandigheden. Deze data kan worden gebruikt om het risico op ontstaan van piping in de afgekeurde dijkvakken beter en nauwkeuriger in te schatten. Doordat hiermee onzekerheden van de ondergrond worden verkleind, zal dit mogelijk tot een aanzienlijke besparing in de versterkingsopgave van het HWBP kunnen leiden.

5.2.1. Verificatie ontwerp

De IR-metingen kunnen ook toegepast worden bij het controleren van uitgevoerde versterkingen, zoals kwelschermen. Hiervoor is aan te raden voorafgaand aan de versterking een meting uit te voeren en na uitvoering van de versterkingsmaatregel bij voorkeur tijdens hoog water.

5.3. Zorgplicht

Vanaf 1 januari 2017 geldt de zorgplicht voor waterkeringen. Door jaarlijkse monitoring van dijkstrekkings bij hoogwater kan het kwelgedrag in de tijd worden gevolgd. Hiermee kan worden bepaald of het kwelgedrag bij bepaalde belasting toeneemt of stabiel is. Een toenemend kwelgedrag in de tijd kan duiden op een afname van de stabiliteit van de kering en een mogelijk vergroot risico op het ontstaan van piping onder maatgevende omstandigheden. Het voordeel van de IR-metingen is dat deze minder afhankelijk zijn van overlast door begroeiing, zoals riet, dat het zicht kan belemmeren en persoonsonafhankelijk zijn.

6. Conclusies & aanbevelingen aan de POV-Piping

6.1. Conclusies

De toepasbaarheid of haalbaarheid staat niet ter discussie bij het toepassen van infraroodmetingen voor dijken. Middels deze haalbaarheidsstudie is op basis van eerder uitgevoerde IR-metingen aangetoond dat IR-metingen een toegevoegde waarde hebben binnen de verschillende stappen van de beoordelingssystematiek (WBI), de versterkingsopgave van het HWBP en de zorgplicht. Net als geofysische meettechnieken zoals grondradar, zullen IR-metingen een toegevoegde waarde hebben voor het beoordelen van de kering op stabiliteit maar ook het controleren van versterkingsmaatregelen. Daarnaast zullen IR-metingen een waardevolle aanvulling vormen bij de zorgplicht waarmee de beheerder objectief kan waarnemen.

6.2. Aanbevelingen

Op basis van de resultaten van de haalbaarheidsstudie worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- 1) Aanbevolen wordt om tezamen met de programmadirectie van het HWBP aangevuld met enkele waterschappen in het rivierengebied een meetcampagne uit te voeren voor de komende jaren voor nog uit te voeren dijkversterkingen (voor mogelijke beperking van de versterkingsopgave) en ter controle van uitgevoerde dijkversterkingen.
- 2) Aanbevolen wordt om IR-metingen op te nemen als een van de basismettechnieken om informatie te vergaren over kwellocaties en zwakke plekken in de beoordeling van pipinggevoelige dijkstrekkingen.
- 3) Aanbevolen wordt om IR-metingen jaarlijks, of bij hoogwater, uit te voeren in het kader van de wettelijke zorgplicht op pipinggevoelige locaties.
- 4) Aanbevolen wordt om het gebruik van IR-metingen in de onderzoeksstrategie voor waterkeringen nader uit te werken.

Daarnaast raden we aan om de meerwaarde van de verschillende geofysische meetmethoden zichtbaar te maken door een aantal voorbeeld projecten in een GIS-omgeving te ontsluiten, zodat zichtbaar wordt hoe met deze extra informatie tot meer inzicht kan worden gekomen met betrekking tot de ongegrond en de bijbehorende afwijkingen, patronen, (in)homogeniteit etc.

7. Bibliografie

- Bakkenist, S. W., & Flos, S. (2015). *Dijkinspectie met drones*. Amersfoort: STOWA.
- Culbertson, C. W., Huntington, T. G., Caldwell, J. M., & O'Donnell, C. (2014). *Evaluation of Aerial Thermal Infrared Remote Sensing to Identify Groundwater Discharge Zones in the Meduxnekeang River, Houlton, Maine*. Virginia: USGS.
- de Zeeuw, R. C. (2016). *(K)weldetectie met behulp van drones*. Den Haag: Shore Monitoring & Research.
- Huang, Y., Fipps, G., Maas, S. J., & Fletcher, S. (2009). Airborne Remote Sensing for Detection of Irrigation Canal Leakage. *Irrigation and Drainage*.
- ITC. (2017, april 13). *ITC's database of satellites and sensors*. Opgehaald van ITC - Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation:
<https://www.itc.nl/Pub/sensordb/getsat.aspx?name=Landsat%208>
- Lemmers, H. (2016, 12 6). *Werken met Drones*. Opgehaald van Waternet:
<https://www.waternet.nl/blog/werken-met-drones/benieuwd-hoe-wij-eeen-warmte-camera-gebruiken-bij-ons-werk/>
- Luijendijk, M. S. (2013). *Monitoringsplan Livedijk Ameland*. Delft: Deltares.
- Majcher, E. H., Phelan, D. J., Lorah, M. M., & McGinty, A. L. (2007). *Characterization of Preferential Groundwater Seepage From a Chlorinated Hydrocarbon - Contaminated Aquifer to West Branch Canal Creek, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 2002-2004*. Virginia: USGS.
- Simons, G., & Droogers, P. (2016). *Verkenning Remote Sensing producten voor het Waterbeheer*. Amersfoort: STOWA.
- Swart, L. (2007). *Remote sensing voor inspectie waterkeringen*. Delft: Rijkswaterstaat.
- van Hemert, H. (2004). *Inspectietechnieken voor droge Veenkaden*. Utrecht: STOWA.
- Wildemeersch, K., Visser, K. P., Van Hoestenbergh, T., Vincke, L., Peeters, P., & Mostaert, F. (2014). *Evaluatie (potentiële) dijkmonitoringstechnieken - detectie kwel/lekkage onder en/of doorheen dijken*. Antwerpen: Waterbouwkundig Laboratorium.

Bijlage 1 Schema Meetstrategie IR

In onderstaand schema is de meetstrategie IR bij dijken samengevat.

Beoordelingsstappen	IR metingen	Resultaat
dijkvak indeling	Meten van dijkstrekkingen en bepalen kwelgedrag per dijkvak onder verschillende omstandigheden	<ul style="list-style-type: none">- geen afwijkingen kwelgedrag binnen 1 dijkvak -> vakindeling juist gekozen- wel afwijkingen binnen 1 dijkvak -> oorzaak hiervan bepalen (heterogeniteit?) vakindeling herzien
Eenvoudige toets	Geen metingen	<ul style="list-style-type: none">- geen toegevoegde waarde
Gedetailleerde toets	<ul style="list-style-type: none">- Controle op kwelgedrag- Bepalen zwakste punt(en) (piping)- herhalingsmetingen- controle op intrede- en uitredpunt	<ul style="list-style-type: none">- bepalen of kwelgedrag stabiel is- bepalen kwel-intensiteit en vertaalslag naar rekenmodellen- vertaalslag naar maatgevende omstandigheden- inzicht in intrede- en uitredpunt
Toets op maat	<ul style="list-style-type: none">- (coninu)metingen tijdens stress test om kwelgedrag te volgen; hierbij zal IR gecombineerd worden ingezet met andere (in-situ)sensoren	<ul style="list-style-type: none">- bepalen stabiliteit kering onder verschillende belastingen en extrapoleren maatgevende omstandigheden- bepalen van kritiek verval over kering waarbij zandtransport (piping) plaatsvindt