

# Eindrapport

## De beoordeling van onder- en achterloopsheid bij bestaande waterkerende kunstwerken



A.J. Boer

november 2005



**TU**Delft



**Foto omslag:**

De Zuiderluis in Almere op locatie de Blocq van Kuffeler tijdens peilbuismetingen in het kader van dit rapport, medio juli 2005.

**Colofon****Afstudeerder:**

A.J. Boer  
IJsvogel 35  
3362 KC Sliedrecht  
0184-414661  
[a.j.boer@student.tudelft.nl](mailto:a.j.boer@student.tudelft.nl)

**Afstudeercommissie:**

Prof. Drs. Ir. J.K. Vrijling (TU Delft)  
Ir. J.T. de Vries (Bouwdienst Rijkswaterstaat)  
Dr. Ir. S. van Baars (TU Delft)  
Ir. K.G. Bezuyen (TU Delft)

**Onderwijsinstelling:**

Technische Universiteit Delft  
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Sectie waterbouwkunde  
Stevinweg 1  
2628 CN Delft  
015-2785440

**Afstudeerinstelling:**

Bouwdienst Rijkswaterstaat  
Gebouw Europastaete  
Europalaan 44  
3526 KS Utrecht  
030-2857641





## Voorwoord

Dit is het eindrapport van het afstudeerproject ‘De beoordeling van onder- en achterloopsheid bij bestaande waterkerende kunstwerken’. Het project is onderdeel van de studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit in Delft, afstudeerrichting Waterbouwkunde. Het onderzoek is uitgevoerd bij de Bouwdienst van Rijkswaterstaat (BWD) in Utrecht.

Het parttime afstuderen heeft een periode bestreken van ca. een jaar. Naast een bureaustudie naar beoordelingmethodieken is een groot deel van de tijd besteed aan het voorbereiden, uitvoeren en uitwerken van peilbuis- en radar/tracer-metingen bij de Zuidersluis in Almere. De chronologie van de verschillende fasen in het onderzoek is in het rapport behouden gebleven.

Een jaar intensief aan een boeiend project werken betekende een eveneens boeiend contact met zeer vele betrokkenen en belangstellenden. Dank hiervoor.

Speciale dank gaat uit naar Jelle de Vries (BWD) voor het bieden van een afstudeerplaats en een jaar lang enthousiaste begeleiding, prof. Vrijling, Stefan van Baars en Kees Bezuyen (TU Delft) voor hun sturing en prettige samenwerking, Jan Tigchelaar en Harry van der Graaf (BWD) voor hun begeleiding van de casestudy en de vele ‘duwtjes in de goede richting’, het sluispersoneel van de Zuidersluis en Ron Dooyeweerd van de Provincie Flevoland voor hun gastvrijheid en behulpzaamheid, Wilco Meijerink en Carlo Zimmerman (BWD) voor hun begeleiding in de beginfase van het afstuderen en hun blijvende behulpzaamheid nadien en Dick van der Roest en Marten van der Rijst (Groundtracer) voor hun expertise en medewerking op het gebied van radar en tracer metingen.

Tot slot dank ik mijn ouders voor hun steun en het in mij gestelde vertrouwen.

Utrecht, 8 november 2005

Arjan Boer





# Inhoudsopgave

Voorwoord .....	I
Inhoudsopgave .....	III
Samenvatting .....	VII
Lijst van figuren en tabellen.....	IX
<b>Deel I Inleiding .....</b>	<b>1</b>
<b>H1 Inleiding .....</b>	<b>3</b>
<b>H2 Beknopte historie van de toetsing op piping.....</b>	<b>5</b>
<b>H3 Probleemanalyse en opzet van het onderzoek .....</b>	<b>7</b>
3.1 Achtergrond.....	7
3.2 Probleembeschrijving .....	7
3.3 Probleemstelling.....	8
3.4 Doelstelling .....	8
3.5 Opzet van het onderzoek .....	8
3.6 Literatuur .....	9
<b>Deel II Meetmethoden.....</b>	<b>11</b>
<b>H4 Inventarisatie meetmethoden .....</b>	<b>13</b>
4.1 Inleiding .....	13
4.2 Peilbuizen en waterspanningsmeter .....	13
4.3 De ECR- en EFT-methode .....	14
4.4 Radar .....	16
4.5 Seismiek .....	20
4.6 Magnetometer.....	21
4.7 Betontester.....	21
4.8 Camerasonde .....	22
4.9 Thermische methoden .....	22
4.10 Tracer .....	23
4.11 Literatuur .....	23
<b>H5 Beoordeling van de meetmethoden.....</b>	<b>25</b>
5.1 Detecteren van kwelschermen.....	25
5.2 Lengtebepaling van kwelschermen .....	26
5.3 Lekdetectie .....	27
5.4 Literatuur .....	28
<b>Deel III Casestudy .....</b>	<b>29</b>
<b>H6 Meetplan Zuidersluis .....</b>	<b>31</b>
6.1 Inleiding .....	31
6.2 Bodemopbouw en bouwwijze .....	31
6.2.1 Bodemopbouw .....	31
6.2.2 Waterstanden.....	32
6.2.3 Bouwwijze.....	32
6.3 Kwelweganalyse.....	32
6.3.1 Beschrijving van de constructie .....	32
6.3.2 Kwelwegen.....	34
6.4 Instrumentarium en plaatsing .....	36
6.4.1 Instrumentarium .....	36



6.4.2 Plaatsing .....	36
6.5 Kosten van het meetprogramma .....	40
6.6 Literatuur .....	40
<b>H7 Hypothesen en opzet van verwerking peilbuismeting.....</b>	<b>41</b>
7.1 Inleiding .....	41
7.2 Hypothesen.....	41
7.2.1 Grondwaterstroming.....	41
7.2.2 Theoretisch stijghoogteverloop.....	42
7.2.3 Tijdsafhankelijkheid.....	43
7.3 Verwerking meetgegevens .....	44
7.3.1 Inleiding .....	44
7.3.2 Diagram van de stijghoogte per buis.....	44
7.3.3 Vergelijking van stijghoogte tussen de buizen onderling .....	45
7.3.4 Symmetrie en richting .....	46
7.4 Schutproces .....	46
7.5 Voorbereiding.....	47
7.5.1 Beschrijving van de pulsboortechniek .....	47
7.5.2 Uitvoering van de boringen.....	48
7.5.3 Verwijderen van de buizen.....	49
7.6 Literatuur .....	49
<b>H8 Meetresultaten en uitwerking .....</b>	<b>51</b>
8.1 Inleiding .....	51
8.2 Verwerking ruwe gegevens .....	51
8.3 Verhang .....	52
8.3.1 Verhanglijn.....	52
8.3.2 Fluctuaties in de stijghoogte.....	54
8.3.3 Conclusie op basis van verhanglijn.....	55
8.4 Stijghoogteverloop in detail .....	56
8.4.1 Waterstanden .....	56
8.4.2 Buitenhoofd.....	57
8.4.3 Schutkolk.....	59
8.4.4 Binnenhoofd.....	60
8.5 Invloed van de keileemlaag op het verhang .....	63
8.5.1 Inleiding .....	63
8.5.2 Analyse.....	63
8.5.3 Tweedimensionale analyse met M-seep.....	67
8.5.4 Sliblagen.....	68
8.6 Literatuur .....	68
<b>H9 Resultaten van meting met hogere frequentie .....</b>	<b>69</b>
9.1 Aanpassingen .....	69
9.2 Resultaten van de aangepaste metingen .....	69
9.3 Invloed legen en vullen van de kolk op de stijghoogte .....	72
9.4 Conclusie .....	75
9.5 Literatuur .....	75
<b>H10 Radar en tracer; uitkomsten en toepassing .....</b>	<b>77</b>
10.1 Uitvoering.....	77
10.2 Uitwerking en resultaten .....	78
10.3 Mogelijke verklaringen .....	80
10.4 Toepassingspotentie .....	80





<b>Deel IV Toepassing en conclusies.....</b>	<b>83</b>
<b>H11 Algemene toepassing peilbuisonderzoek.....</b>	<b>85</b>
11.1 Inleiding .....	85
11.2 Aantonen van kwelvoorzieningen .....	85
11.2.3 Filters.....	88
11.3 Stromingsanalyse .....	88
11.3.1 Onderloopsheid .....	89
11.3.2 Achterloopsheid .....	90
11.3.3 Combinatie van verticale en horizontale stroming.....	90
11.3.4 Heave.....	91
11.4 Lokaal versus globaal.....	91
11.5 Maatgevende omstandigheden versus meetomstandigheden.....	91
11.6 Drie-in-één criterium.....	91
11.7 Literatuur.....	92
<b>H12 Denkmodel beoordeling onder- en achterloopsheid.....</b>	<b>93</b>
<b>H13 Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>97</b>
13.1 Conclusie meetmethoden .....	97
13.2 Conclusies casestudy.....	97
13.3 Aanbevelingen.....	98

## **Bijlagen:**

- Bijlage 1: overzicht meetmethoden; voordelen, nadelen en beperkingen
- Bijlage 2: situatietekening gemaal en sluis op locatie De Blocq van Kuffeler, met uitgevoerde boringen
- Bijlage 3: boorstaten van de boringen B1 en B2
- Bijlage 4: configuratie en afmetingen kwelschermen Zuidersluis
- Bijlage 5: theoretisch mogelijke kwelwegen
- Bijlage 6: toelichting op het faalmechanisme heave
- Bijlage 7: situatietekening Zuidersluis met de plaats van de meetpunten.
- Bijlage 8: maatgevende theoretische kwelweg en verhanglijnen
- Bijlage 9: tijdsafhankelijkheid
- Bijlage 10: situatietekening Zuidersluis met revisie van meetpunten (uitklapvel)
- Bijlage 11: verslag van de pulsboringen en installatie van de peilbuizen
- Bijlage 12: foto's van de Zuidersluis in aanbouw (1964)
- Bijlage 13: deel van overzichtstekening ZZWXT000146, keileemlagen





## Samenvatting

Bij de wettelijk verplichte vijfjaarlijkse toetsing op het functioneren van de primaire waterkeringen in Nederland, vastgelegd in de Wet op de Waterkering, doet zich het probleem voor dat sommige constructies moeilijk te beoordelen zijn. Een belangrijk punt van de beoordeling waarbij, voor een goede toetsing, vaak onvoldoende gegevens beschikbaar zijn is het faalmechanisme piping. Piping is het mechanisme waarbij een doorgaand erosiekanaal onder of naast een kunstwerk ontstaat, als gevolg van een kwelstroom. De erosie kan leiden tot functieverlies van het kunstwerk en uiteindelijk tot bezwijken.

De doelstelling van het onderzoek is: het ontwikkelen van een denkmodel voor het op efficiënte wijze verkrijgen van adequate aanvullende informatie over onder- en achterloopsheid van bestaande waterkerende kunstwerken, ten behoeve van een meer waarheidsgetrouw toetsresultaat op dit onderdeel. De kennis en het inzicht voor het behalen van dit doel zijn grotendeels verkregen door het uitvoeren van een casestudy. De studie bestaat uit het uitvoeren van peilbuis- en radar/tracer metingen. Voor deze methoden is gekozen na een inventarisatie en beoordeling van, voor pipingonderzoek bruikbare, technieken.

Het onderwerp van de casestudy is een schutsluis op locatie De Blocq van Kuffeler te Almere. Deze Zuidersluis is in een verkenning geschikt bevonden voor een peilbuisonderzoek vanwege het grote verval van 5 meter over de relatief korte sluislengte van 110m, in combinatie met de overwegend zandige bodem. Bij het opstellen van het meetplan is kennis opgedaan over de plaats, het aantal en de diepte van de meetfilters. Er is een meetprogramma opgesteld met 11 meetfilters verdeeld over 6 meetlocaties in de directe omgeving van de sluis. Vanaf begin juni 2005 is drie weken met de geïnstalleerde apparatuur gemeten. De buizen waren voorzien van divers die eens per week elektronisch werden uitgelezen. De kosten van het complete onderzoek bedroegen 14.000 euro.

Uit de metingen kan worden geconcludeerd dat de Zuidersluis voldoende veiligheid heeft op het onderdeel piping. Met de buizen kan aangetoond worden dat een bovenstroomse keileemlaag goed functioneert en de vier kwelschermen, afhankelijk van hun breedte, eveneens bijdragen aan de afname van het verval over de lengte van de sluis. Het uittreeverhang is ruim 9 maal kleiner dan het toelaatbare. Een benedenstroomse keileemlaag lijkt op basis van de metingen niet te functioneren. In de buizen direct naast de sluis wordt een fluctuatie in stijghoogte van ca. 15cm gemeten. Deze fluctuatie is in fase met de schutting van de kolk. Uit onderzoek met hogere meetfrequentie (elke 50s i.p.v elke 15min een meting) blijkt de oorzaak hiervan geen lekkage te zijn, maar wateroverspanning als gevolg van de op en neer gaande beweging van de sluis.

Uit metingen met een oppervlakteradar gekoppeld aan het Global Positioning System kan op eenvoudige en snelle wijze de plaats van kwelschermen worden bepaald. De nauwkeurigheid is sterk afhankelijk van de bodemsamenstelling en de grondwaterstand. Plaatsbepaling van bijvoorbeeld kwelschermen is om deze reden succesvoller dan het bepalen van de aanlegdiepte. Met tracer-technologie is getracht concentraties van goed geleidend materiaal (grondwater) te traceren en hiermee de grondwaterstroming rond het kunstwerk in kaart te brengen. De meting bevestigt het stromingsbeeld uit de peilbuisstudie, maar biedt als methode op zich in het kader van pipingonderzoek weinig perspectief.



De resultaten van de studie bevestigen het nut van praktisch onderzoek op het gebied van onder- en achterloopsheid. Met weinig middelen kan op relatief eenvoudige wijze veel extra informatie worden verkregen. Met een verhanglijn en uitreeverhang op basis van een goed voorbereide en gefaseerde peilbuismeting zal waarschijnlijk in de meeste gevallen een waarheidsgetrouw oordeel omtrent de veiligheid tegen piping gegeven kunnen worden. Toepassing zal waarschijnlijk pas nodig zijn als een kunstwerk voldoet aan het drie-in-één criterium; korte kunstwerken met een groot verval op een zandige bodem zijn het meest pipinggevoelig.

In de studie is behalve op een praktische benadering ook toegespitst op een driedimensionale benadering van het pipingprobleem. Aanbevolen wordt deze werkwijze voort te zetten en de meetgegevens en gedocumenteerde kennis te gebruiken als invoer voor een driedimensionaal computermodel. Dit model kan (voor de Zuidersluis) worden gebruikt bij de modellering van tijdsafhankelijkheid van piping, een onderwerp dat in de huidige toetspraktijk nog onderbelicht is.



# Lijst van figuren en tabellen

## Deel I Inhoud

Figuur 3.1: inperking uitkomstenruimte.....	9
---	---

## Deel II Meetmethoden

Figuur 4.1: peilbuizen aan weerszijden van een niet goed aansluitend kwelscherm.....	14
Figuur 4.2: schematisering en uitvoering van de EFT methode .....	15
Figuur 4.3: kettingsensormethode .....	16
Figuur 4.4: overzicht meetopstelling boorgatradar en gebruik oppervlakteradar .....	17
Figuur 4.5: horizontale doorsnede over grondradar en twee wanden .....	17
Figuur 4.6: meting en uitkomst met methode boorgatradar .....	18
Figuur 4.7: toepassing radartomografie .....	19
Figuur 4.8: uitvoering en resultaat tomografiemethode .....	19
Figuur 4.9: uitvoering oppervlakte tot boorgat meting .....	20
Figuur 4.10: bovenaanzicht sluis met boorgaten voor seismische methoden.....	20
Figuur 4.11: sondering met een magnetometer vlak naast de constructie .....	21

## Deel III Casestudy

Figuur 6.1: ligging van locatie De Blocq van Kuffeler.....	31
Figuur 6.2: aansluiting onderloopsheidscherm op betonconstructie.....	33
Figuur 6.3: schematisatie bovenaanzicht en zijaanzicht sluis met schermen.....	34
Figuur 6.4: definitieschets heave.....	35
Figuur 6.5: potentiaallijnen bij een spleet tussen constructie en ondergrond.....	37
Figuur 6.6: potentiaallijnen bij homogene grondslag.....	37
Figuur 6.7: plaatsing van de filters in buizen 1 en 2 bij scherm A.....	38
Figuur 6.8: schets plaatsing peilbuizen.....	38
Tabel 6.1: mogelijkheden tot vergelijking tussen verschillende peilbuizen .....	39
Tabel 6.2: geschatte kosten van het meetprogramma .....	40
Figuur 7.1: overzicht van sluis, gemaal en polders met de peilbuizen M1 en M2.....	41
Figuur 7.2: verwachte richting van grondwaterstroming in gebied rond Zuidersluis.....	42
Figuur 7.3: theoretische verhanglijn op basis van de methode van Lane .....	43
Figuur 7.4: schets van diagram met waterstanden uitgezet tegen de tijd.....	44
Figuur 7.5: stroming rond getrappt kwelscherm .....	45
Figuur 7.6: vergelijking tussen B1 en B2 t.b.v. het aantonen van stroming .....	45
Figuur 7.7: vergelijking tussen de verschillende filterniveaus van B1 .....	46
Figuur 7.8: uitvoering pulsboringen.....	47
Figuur 7.9: de uitvoering van boring B6. Het schoonzuigen van het filter.....	48
Figuur 8.1: deel van de tabel met ruwe meetwaarden van diver 1-diep.....	51
Figuur 8.2: deel van de tabel met meetwaarden van diver 1-diep na bewerking.....	52
Figuur 8.3: verhanglijn op basis van de meetresultaten .....	53
Figuur 8.4: verloop van de stijghoogte in B1-diep.....	54
Figuur 8.5: het verloop van de stijghoogte in B1-diep, gecorrigeerd voor de luchtdruk .....	55
Figuur 8.6: waterstanden in de Hoge Vaart en op het Markermeer in week 24.....	57
Figuur 8.7: verloop van de stijghoogte in meetpunt B1 op 16 juni.....	57
Figuur 8.8: verloop van stijghoogte in meetpunt B2 op 16 juni .....	58
Figuur 8.9: schematisering van grondwaterstroming t.p.v. het buitenhoofd.....	58
Figuur 8.10: vergelijking stijghoogte B3 en B4 op 16 juni.....	59
Figuur 8.11: stijghoogteverloop in de punten B3 en B5 .....	60



Figuur 8.12: stijghoogten in B6 op 16 juni .....	60
Figuur 8.13: stroming rond de schermen C en D onder het binnenhoofd .....	61
Figuur 8.14: stijghoogteverloop in enkele meetpunten op 16 juni.....	62
Figuur 8.14: verhanglijn.....	63
Figuur 8.15: schematische doorsnede over de bovenstroomse keileemlaag.....	64
Figuur 8.16: verhanglijn met invloed houten scherm en bovenstroomse keileemlaag. ....	64
Figuur 8.17: verhanglijn met enkel de invloed van de keileemlaag.....	65
Figuur 8.18: verhanglijn met invloed houten scherm, zonder factor 1/3. ....	65
Figuur 8.19: aangepaste verhanglijn, beperking van de invloed van de schermen.....	66
Figuur 8.20: potentiaallijnen bij twee werkende keileemlagen.....	67
Figuur 8.21: potentiaallijnen bij een niet werkende keileemlaag benedenstrooms.....	68
Figuur 9.1: verloop stijghoogte in meetpunt B3 op zondag 10 juli 2005.....	69
Figuur 9.2: verloop stijghoogte in meetpunt B3 op dinsdag 5 juli 2005.....	70
Figuur 9.3: verloop stijghoogte in meetpunt B3 op woensdag 6 juli 2005 .....	71
Figuur 9.4: vergelijking tussen de buizen B2 en B3 .....	71
Figuur 9.5: verloop van de grondwaterstand in B3 en B5 op dinsdag 5 juli.....	72
Figuur 9.6: grondwaterpatronen.....	72
Figuur 9.7: verloop van de grondwaterstand in B3 tijdens het vullen van de kolk.....	73
Figuur 9.8: verloop van de grondwaterstand in B3 tijdens het legen van de kolk.....	73
Figuur 9.9: grondwatertemperatuur in de peilbuizen 3 en 5 op 10 juli.....	74
Figuur 10.1: radar en tracer, apparatuur en gebruik.....	77
Figuur 10.2: radarprofielen, rechts is de meetlocatie aangegeven .....	78
Figuur 10.3: grafische uitvoer van tracerresultaten.....	79
Figuur 10.4: uitvergroting traceruitvoer, westelijk van het buitenhoofd.....	79
Figuur 10.5: aanzicht traceruitvoer in westelijke richting.....	80
<b>Deel IV Toepassing en conclusies</b>	
Figuur 11.1: plaats kwelscherm en vorm van de verhanglijn .....	85
Figuur 11.3: meetfilters om het verhang over de sluis kolk te bepalen .....	89
Figuur 11.4: stroming rond getrapt kwelscherm. ....	90
Figuur 11.5: achterloopsheid, uittreden van grondwater via het talud.....	90
Figuur 12.1: Stappenplan beoordeling op onder- en achterloopsheid.....	93
Tabel 13.1: samenvatting onderzoek meetmethoden .....	97



# Deel I Inleiding

<b>H1 Inleiding .....</b>	<b>3</b>
<b>H2 Beknopte historie van de toetsing op piping .....</b>	<b>5</b>
<b>H3 Probleemanalyse en opzet van het onderzoek .....</b>	<b>7</b>
3.1 Achtergrond.....	7
3.2 Probleembeschrijving.....	7
3.3 Probleemstelling.....	8
3.4 Doelstelling .....	8
3.5 Opzet van het onderzoek .....	8
3.6 Literatuur.....	9







# H1 Inleiding

In de Wet op de Waterkering (WoW) is bepaald dat alle kunstwerken in de primaire waterkeringen in Nederland om de vijf jaar getoetst dienen te worden op hun veiligheid. Een belangrijk aspect van deze toets is de beoordeling op het faalmechanisme piping. In de huidige praktijk is sprake van een theoretische toetsing gebaseerd op de methoden van Bligh, Lane en Sellmeijer. Met name bij oudere kunstwerken echter, is een groot deel van de gegevens benodigd voor een goede beoordeling, niet te achterhalen. Ook als wel voldoende gegevens beschikbaar zijn voor een theoretische toetsing, blijkt de praktijk toch vaak anders dan de theorie. Een belangrijke verbetering zou zijn; het driedimensionaal benaderen van de pipingproblematiek.

In dit afstudeeronderzoek worden methoden onderzocht om meer en betrouwbaarder gegevens over onder- en achterloopsheid te verkrijgen. Het onderzoek richt zich met name op de verzameling van gegevens door middel van het uitvoeren van metingen. Een groot deel van het rapport behandelt de voorbereiding, uitvoering en verwerking van stijghoogte en radar metingen bij de Zuidersluis in Almere, op de locatie De Blocq van Kuffeler. Door het analyseren van verschillen en overeenkomsten tussen de praktijk en de theorie en het zoeken naar verklaringen hiervoor wordt een betere basis gelegd voor toekomstige toetsingen op piping. Het rapport eindigt dan ook met opmerkingen betreffende de algemene toepassing van de opgedane kennis in de toetspraktijk en een denkmodel voor de beoordeling van onder- en achterloopsheid.

De delen I en II geven respectievelijk een inleiding op de problematiek en de bespreking van meetmethoden. In hoofdstuk 2 wordt begonnen met een korte geschiedenis van de toetsing op piping. In hoofdstuk 3 staan de probleemanalyse, de probleem- en doelstelling en de opzet van het onderzoek. In hoofdstuk 4 wordt een groot aantal meetmethoden besproken, die vervolgens in hoofdstuk 5 worden beoordeeld op hun toepasbaarheid op het gebied van piping.

Deel III van het rapport beschrijft de casestudy en bestaat uit de hoofdstukken 6 t/m 10. In de hoofdstukken 6 en 7 wordt het meetprogramma voor de peilbuismetingen bij de Zuidersluis behandeld. De hoofdstukken 8 en 9 beschrijven de meetresultaten van de casestudy. In hoofdstuk 10 worden de uitvoering en resultaten van een radar en tracer meting bij de Zuidersluis behandeld.

Deel IV bestaat uit de hoofdstukken 11, 12 en 13. Hoofdstuk 11 bevat een bespreking over de mogelijkheid van een praktische benadering van de pipingproblematiek in het algemeen. Hier wordt de verkregen kennis uit de casestudy samengevat en voorzien van kanttekeningen voor algemeen gebruik. Hoofdstuk 12 bevat de bevindingen van hoofdstuk 11 samengevat in een denkmodel. Dit model kan als leidraad dienen bij de toetsing van waterkerende kunstwerken met stijghoogtemetingen en is het feitelijke antwoord op de doelstelling. Hoofdstuk 13 tot slot geeft de conclusies en aanbevelingen.





## H2 Beknopte historie van de toetsing op piping

De basis voor de huidige manier van toetsen op het mechanisme piping is een eeuw geleden gelegd door W.G. Bligh. In 1907 stelt hij dat piping onder metselwerkdammen afhankelijk is van het gewicht van de constructie (het massief van de dam). In 1910 komt hij, in een publicatie in *Engineering News* [1], op zijn eigen bewering terug en stelt voor te controleren op basis van de ratio tussen de lengte van het pipingpad en het verval over de dam. Het pipingpad (line of creep) wordt hierbij door hem gedefinieerd als de kortste afstand tussen het intreepunt en het uitreepunt onder het kunstwerk door. Stroming vindt, in deze benadering, dus plaats langs het oppervlak tussen de fundering van het kunstwerk en de ondergrond.

Na het verschijnen van het artikel van Bligh volgt kritiek op zijn methode. Het voornaamste kritiekpunt is het ontbreken van een verschil in weerstand tussen een horizontaal en verticaal deel van de kwelweg. Naast de benadering volgens Bligh bestaat reeds de opvatting dat het water simpelweg de weg van de minste weerstand kiest en zich door de (ongeroerde) bodem een weg zoekt van hoge naar lage stijghoogte. Deze zogenaamde short path methode is aannemelijk, maar gaat voorbij aan het punt dat de weerstand op het grensvlak tussen fundering en bodem vaak lager is dan elders in de bodem en dat deze route juist daarom maatgevend kan zijn.

In 1918 verschijnt in *Transactions of the American Society of Civil Engineers* een artikel van E.W. Lane [2] waarin bovenstaande ideeën en de kritiek daarop nog eens worden samengevat. Bovendien beschrijft Lane een nieuwe methode die de positieve punten van Bligh (line of creep methode) en de short-path methode combineert. Ook hier is nog steeds sprake van onderzoek naar piping bij metselwerkdammen, feitelijk dus alleen onderloopsheid. Lane stelt de weighted creep methode voor waarbij verticale kwelwegen meer gewicht in de schaal leggen dan horizontale. Op basis van proeven bij ruim 200 dammen wordt een ratio tussen verticale weerstand en horizontale weerstand van 3 aanbevolen. Hiermee wordt de weighted creep afstand in de meeste gevallen korter dan de line of creep en daarmee maatgevend voor de controle op piping. Lane beveelt aan met name de verticale kwelweg te verlengen als extra weerstand nodig is, daar deze meer invloed heeft op de weerstand tegen piping en deze maatregel dus economischer is. Het gebruik van kwelschermen wordt aangeraden mits minimaal twee rijen schermen worden toegepast. Mocht één scherm lek raken of anderszins niet meer voldoen dan kan het andere de remmende werking overnemen.

In de Nederlandse ontwerppraktijk zijn de methoden van Bligh en Lane naast elkaar toegepast. De methode van Bligh wordt toegepast bij de beoordeling en het ontwerp van dijken. Bij waterkerende kunstwerken wordt de methode van Lane toegepast, vanwege de mogelijkheid van verticale kwelwegen. Naast de klassieke regels van Bligh en Lane is door de jaren heen ervaring opgedaan en vastgelegd over het effectief ontwerpen op piping. Hierbij wordt gedacht aan de verhandelingen van Josephus Jitta in zijn boek, *Sluizen en andere waterbouwkundige kunstwerken in en langs kanalen* [3].

In 1989 resulteerde Nederlands onderzoek door J.B. Sellmeijer in een wiskundig model voor de beschrijving van de erosie die ten grondslag ligt aan piping. De ontwerpregels die hieruit voortkwamen leidden tot een gunstiger dimensionering van de benodigde horizontale kwelweg dan op basis van de regels van Bligh. Het model van Sellmeijer is echter niet bruikbaar bij verticale kwelwegen en alleen bedoeld voor de dimensionering van dijken.



In 1995 werden eveneens door Sellmeijer regels opgesteld voor het dimensioneren op heave achter een kwelscherm. Deze zogenaamde fragmentenmethode kan worden gebruikt als op basis van Lane een onvoldoende toetsresultaat verkregen wordt.

### **Literatuur**

- [1] Bligh, W.G., Dams, Barrages and Weirs on porous foundations - Engineering News 1910, p 708
- [2] Lane, E. W., Security from underseepage: masonry dams on earth foundations – Transactions of the American society of civil engineers 1935, vol. 100 p1235-1272
- [3] Jitta, J.P. Josephus, Sluizen en andere waterbouwkundige kunstwerken in en langs kanalen – de Erven F. Bohn N.V. Haarlem, 1947



## H3 Probleemanalyse en opzet van het onderzoek

### 3.1 Achtergrond

Op 29 oktober 1957 gaat de Tweede kamer akkoord met de Deltawet. Deze wet bevat voorstellen voor de verbetering van de veiligheid van Nederland tegen stormvloed. De directe aanleiding voor deze wet was de watersnoodramp van februari 1953, waarbij grote delen van Nederland onder water kwamen te staan en 1853 mensen het leven lieten.

Op 10 mei 1997, 40 jaar na de goedkeuring van de Deltawet, wordt het laatste kunstwerk in gebruik genomen; de Maeslantkering bij Hoek van Holland. Met de gereedkoming van dit laatste kunstwerk houdt de zorg voor veiligheid tegen overstromingen uiteraard niet op. Het is zaak voortdurend te controleren of de aanwezige waterkeringen nog wel aan hun functie voldoen, zoals blijkt uit het volgend citaat afkomstig uit de Leidraad Toetsen op Veiligheid (LTV [1]):

*‘Sinds de watersnoodramp is een groot deel van de primaire waterkeringen versterkt. Sommige keringen zijn al in de jaren kort na de ramp versterkt, andere keringen zijn in de laatste jaren aangepakt. Een deel van de rivierdijken en de dijken langs het IJsselmeer wordt de komende jaren in het kader van het Deltaplan Grote Rivieren versterkt. Maar, met het versterken van de waterkeringen is de waterkeringszorg niet afgerond. Een duurzame handhaving van de bereikte veiligheid maakt onderdeel uit van deze waterkeringszorg. Door regelmatig de daadwerkelijk aanwezige veiligheid van de waterkering vast te stellen en deze te beoordelen in het licht van veranderende belastingen kan de vinger aan de pols worden gehouden.’*

De bovengenoemde beoordeling is vastgelegd in de Wet op de Waterkering van 21 december 1995. Hierin staat onder andere dat de beheerder van een dijkkringgebied elke vijf jaar verslag uit moet brengen omtrent de algemene waterstaatkundige toestand van de primaire waterkering.

Op verzoek van de Minister van Verkeer en Waterstaat heeft de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) een leidraad opgesteld om de toetsing volgens vaste rekenregels te laten verlopen. Dit heeft geresulteerd in de Leidraad Toetsen op Veiligheid (vanaf 2001 vervangen door het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (LTV [2]) welke, samen met het randvoorwaardenboek, de basis vormt voor de toetsing van waterkeringen in Nederland op veiligheid.

### 3.2 Probleembeschrijving

Bij de wettelijk verplichte vijfjaarlijkse controle op het functioneren van waterkeringen doet zich het probleem voor dat sommige, vaak oude, constructies erg moeilijk te beoordelen zijn. De problemen hebben betrekking op:

- het ontbreken van adequate gegevens voor de toets (te denken valt aan bodemgesteldheid en geometrie van de constructie)
- een veranderde situatie ten opzichte van de oorspronkelijke (te denken valt aan zetting van de ondergrond en afname van de kwaliteit van de gebruikte materialen)
- het onbereikbaar zijn van bepaalde constructieonderdelen zodat een visuele inspectie niet mogelijk is (te denken valt aan onderloopsschermen bij sluizen)

Mede als gevolg van de vele onzekerheden bij het toetsen van kunstwerken zijn de richtlijnen erg conservatief. Bij een flink aantal kunstwerken in Nederland (ca. 800, bron: stichting toegepast onderzoek waterbeheer, STOWA) kan men zich na toetsing afvragen of de



constructie inderdaad niet meer voldoet, of dat de toetsing wellicht te conservatief is uitgevoerd. Een methode om meer te weten te komen over de staat waarin het kunstwerk verkeert, is metingen uitvoeren aan de constructie. Met de extra informatie uit de metingen kan wellicht een beter oordeel over de toestand van het kunstwerk worden gegeven.

Eén van de onderdelen van vooral oude kunstwerken waarbij bij toetsing vaak sprake is van een gebrek aan informatie is onder- en achterloopsheid. Als gevolg hiervan is de uitkomst van de toetsing óf te conservatief, óf mogelijke, niet direct zichtbare, problemen worden in de toetsing niet meegenomen. In dit laatste geval wordt de sterkte juist overschat. Uit de praktijk blijkt dat bij een theoretische beoordeling op onder- en achterloopsheid volgens de Leidraad Toetsen op Veiligheid landelijk 20% van alle kunstwerken in primaire waterkeringen onvoldoende scoort.

Bij een flink aantal kunstwerken is de afgelopen jaren door de betrokkenen twijfel geuit over de juistheid van de toetsresultaten. Men denkt dat de regels die aan de toets ten grondslag liggen te conservatief zijn, of dat bepaalde (positieve) aspecten volledig worden genegeerd. Er is op dit moment echter geen andere toetsingsmogelijkheid voorhanden dan de theoretische toetsing zoals voorgeschreven in de TAW Leidraad Toetsen op Veiligheid. Concreet meten aan kunstwerken zal extra informatie opleveren zodat de toestand van het kunstwerk beter beoordeeld kan worden. Dit meten heeft echter alleen zin als vooraf de situatie rondom een kunstwerk wordt geanalyseerd. Het breed opzetten van een dergelijke analyse en het samenvatten van de resultaten in een denkmodel, moet het onderzoek ook toepasbaar maken voor de beoordeling van andere kunstwerken.

### **3.3 Probleemstelling**

De toetsing op veiligheid van bestaande waterkerende kunstwerken is op bepaalde onderdelen niet goed mogelijk door het ontbreken van gegevens over het kunstwerk.

### **3.4 Doelstelling**

Het ontwikkelen van een denkmodel voor het op efficiënte wijze verkrijgen van adequate aanvullende informatie over onder- en achterloopsheid van bestaande waterkerende kunstwerken, ten behoeve van een meer waarheidsgetrouw toetsresultaat op dit onderdeel.

### **3.5 Opzet van het onderzoek**

Het verzamelen van gegevens om te komen tot een betere beoordeling van onder- en achterloopsheid wordt gefaseerd aangepakt. Allereerst wordt gezocht naar meetmethoden die geschikt zijn voor de verzameling van gegevens over onder- en achterloopsheid. Vervolgens wordt beoordeeld welke methoden het meest hoopgevend zijn. Uit deze meettechnieken worden één of twee technieken gekozen die daadwerkelijk toegepast worden in een praktijksituatie.

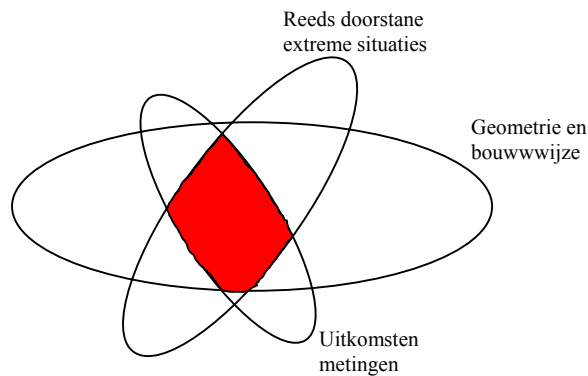
Bij meten is het uitermate belangrijk dat van tevoren bedacht wordt welke uitkomsten mogelijk zijn. Er moet een hypothese worden opgesteld over de uitkomsten van de metingen. Om dit concreet te maken zal gewerkt worden met scenario's. Deze zullen betrekking hebben op de grondwaterstroming langs en onder de te onderzoeken sluis.



Op basis van verschillende gegevens kunnen vervolgens scenario's worden uitgesloten. Deze gegevens kunnen zijn:

- de geometrie en bouwwijze van de sluis
- gegevens over wat het kunstwerk tijdens de levensduur al heeft doorstaan
- de uitkomsten van stijghoogtemetingen
- eventueel uitkomsten van een meer gedetailleerde vervolgmeting

Het aantal scenario's wordt dus ingeperkt aan de hand van voortschrijdend inzicht in de grondwaterstroming langs en onder de te onderzoeken kunstwerken.



*Figuur 3.1: inperking uitkomstenruimte*

Bovenstaande is op te vatten als de inperking van een uitkomstenruimte, door het verkrijgen van steeds meer gegevens.

### 3.6 Literatuur

- [1] Leidraad toetsen op veiligheid – TAW september 1999 Basisrapport waterkerende kunstwerken en bijzondere constructies – TAW, juni 1997
- [2] Voorschrift Toetsen op Veiligheid – Ministerie van verkeer en Waterstaat, januari 2004





## Deel II Meetmethoden

<b>H4 Inventarisatie meetmethoden.....</b>	<b>13</b>
4.1 Inleiding .....	13
4.2 Peilbuizen en waterspanningsmeter .....	13
4.3 De ECR- en EFT-methode .....	14
4.4 Radar .....	16
4.5 Seismiek .....	20
4.6 Magnetometer .....	21
4.7 Betontester .....	21
4.8 Camerasonde .....	22
4.9 Thermische methoden .....	22
4.10 Tracer .....	23
4.11 Literatuur .....	23
<b>H5 Beoordeling van de meetmethoden .....</b>	<b>25</b>
5.1 Detecteren van kwelschermen .....	25
5.2 Lengtebepaling van kwelschermen .....	26
5.3 Lekdetectie .....	27
5.4 Literatuur .....	28





## H4 Inventarisatie meetmethoden

### 4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van beschikbare meetmethoden om extra informatie ten behoeve van een betere beoordeling op onder- en achterloopsheid te verkrijgen. Een aantal van de technieken wordt reeds in meer of mindere mate gebruikt bij onderzoek aan piping, de andere technieken zijn nog niet eerder op dit gebied toegepast. In bijlage 1 is een overzicht opgenomen van alle in dit hoofdstuk behandelde methoden. Hier worden per methode het toepassingsgebied en de voor- en nadelen bij gebruik op het gebied van pipingonderzoek nog eens samengevat.

### 4.2 Peilbuizen en waterspanningsmeter

Peilbuizen kunnen worden gebruikt als instrument bij de detectie van kwelschermen en bij het opsporen van lekkages in schermen. De bepaling van de lengte van een kwelscherm is met deze techniek niet mogelijk.

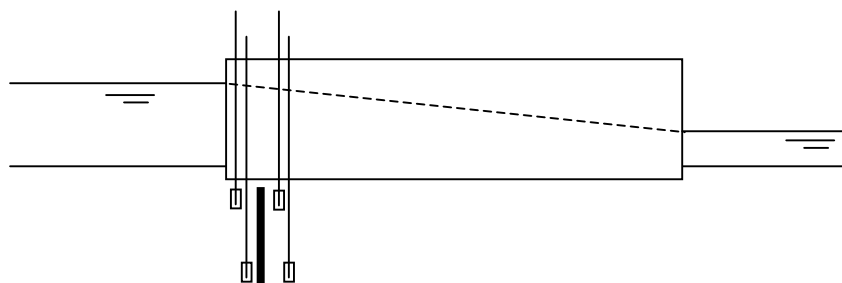
De werking van een peilbuis is eenvoudig en de methode is reeds veelvuldig toegepast. De stijghoogte (grondwaterdruk) wordt gemeten in peilbuizen van metaal of PVC met een standaarddiameter van bijvoorbeeld 25, 33 of 55mm. De buizen worden geplaatst in boorgaten die mechanisch worden gemaakt. In veel gevallen (o.a. afhankelijk van de te boren diepte en de grondslag) wordt gebruik gemaakt van een puls boring. Aan de onderzijde van de buis wordt een filter aangebracht dat een goede (blijvende) werking van de buis moet garanderen. Er kan worden gekozen voor het aanbrengen van meerdere buizen per boorgat. Elke buis heeft in dit geval het filter op een andere diepte. De invloed op de stijghoogte van een spleet onder een constructie of de invloed van een natuurlijke afdichtende laag kan op deze manier gemeten worden (zie figuur 4.1).

Het uitlezen van een peilbuis kan zowel handmatig als automatisch. Handmatig meten betekent dat een discrete set data wordt verkregen, bij automatisch meten is een continue meting mogelijk. Gangbare meetinstrumenten hebben geheugencapaciteit voor ongeveer 21000 waarden, hetgeen neerkomt op bijvoorbeeld een week lang elke 30 seconden een registratie. Welke methode toegepast moet worden hangt af van de informatie die men wil verkrijgen. Met een continue registratie wordt elke verandering in waterdruk waargenomen zodat ook kortdurende fluctuaties geregistreerd kunnen worden. Met een handmatige meting wordt meer een beeld (weliswaar met vertraging) van de grondwaterdruk over langere tijd verkregen.

Voordelen van de methode zijn de eenvoudige apparatuur en de gemakkelijke verwerking van de meetgegevens. Het grootste nadeel van de methode als detectie voor kwelschermen is het feit dat slechts de invloed van een scherm wordt bepaald en niet de plaats van het scherm zelf. Uit de analyse van het stijghoogteverloop onder en naast de constructie moet bepaald worden of één of meerdere kwelschermen aanwezig zijn. Het effect is meestal wel waar te nemen, de plaats blijft vaak onduidelijk. Opgemerkt wordt dat meting van het effect vaak reeds voldoende is om een oordeel over de pipinggevoeligheid van een kunstwerk te kunnen geven. Door het toepassen van een tweede serie metingen kan met de informatie van de eerste keer de plaats van de schermen wel duidelijker worden vastgesteld.



Als schermen niet waterdicht op de constructie aansluiten, of lek zijn, worden ze met een stijghoogtemeting waarschijnlijk niet waargenomen. Dit hangt af van de grootte van de lekkage. Of er nu geen scherm aanwezig is, of dat het scherm dat aanwezig is niet meer functioneert leidt tot dezelfde conclusie; er is (op de gemeten plaats) geen extra weerstand tegen piping (zie figuur 4.1). De stijghoogten zijn aan weerszijden ongeveer gelijk, er is ieder geval geen sprong in de verhanglijn.



*Figuur 4.1: peilbuizen aan weerszijden van een niet goed aansluitend kwelscherm.*

Het gebruik van peilbuizen voor lekdetectie is een beproefde methode bij bouwkuipen en bij elk damwandmateriaal toepasbaar. Als de tijdsdruk niet groot is kan meestal in twee series metingen een lek wel worden vastgesteld. Hierbij gaat men eerst uit van een grof raster met peilbuizen, waarna, na analyse van de meetresultaten, een tweede serie (dichter op elkaar geplaatste buizen) wordt aangebracht. Vaststellen van de diepte waarop een lek zich bevindt is niet goed mogelijk. Met behulp van filters op verschillende diepten kan hier slechts grofweg een uitspraak over worden gedaan. De geplaatste peilbuizen kunnen eventueel achterblijven en als onderdeel van een monitoringssysteem dienst gaan doen. Hiermee kan de grondwaterstroming onder de constructie continu worden geregistreerd.

Tot slot wordt opgemerkt dat in plaats van peilbuizen ook gekozen kan worden voor het aanbrengen van waterspanningsmeters. Hiermee wordt de grondwaterdruk direct gemeten. Het voordeel van deze apparatuur is dat ook de respons op snelle waterstandsfluctuaties gemeten kan worden. Dit is bijvoorbeeld interessant bij sluizen in een getijdengebied. In bijlage 1 worden peilbuis en waterspanningsmeter apart beoordeeld.

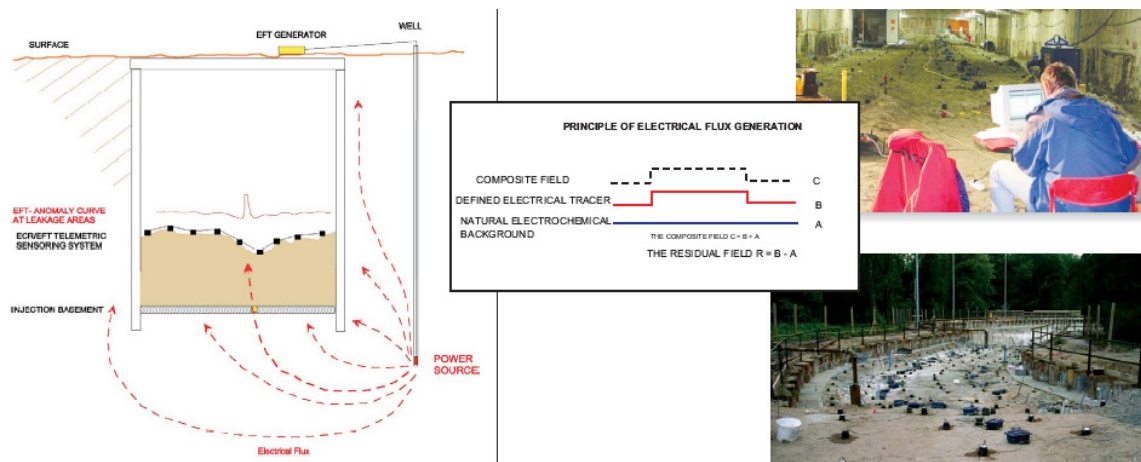
### **4.3 De ECR- en EFT-methode**

De Elektro Chemical Respons (ECR) methode berust op het principe dat de stroming van grondwater een verhoging van het ionentransport teweegbrengt. Met zeer gevoelige sensoren kan dit transport worden geregistreerd. De Electric Flux Tracking methode (EFT) is een verbetering van de ECR methode. Door zelf een stroomstoot in de ondergrond te voeren, wordt extra ionentransport opgewekt. De methode blijkt hiermee betere resultaten te geven (zie figuur 4.2). [1] De methoden zijn toepasbaar bij de detectie van kwelschermen en lekdetectie.

Oorspronkelijk ontwikkeld voor de detectie van lekken in damwandkuipen, was het doel van de ECR/EFT methoden het aangeven van de plaats van een lek. Hoe diep dit lek zat was niet te detecteren en eigenlijk ook niet direct belangrijk. Er moest toch ontgraven en gerepareerd worden. De lengte waarover dit moest gebeuren was van ondergeschikt belang. Er is dus sprake van een 2-D afbeelding van de ondergrond. [1]

De EFT methode wordt reeds op twee manieren toegepast, een derde manier is in ontwikkeling:

1. Een raster van (multi)sensoren op maaiveld, die gelijktijdig meten en waarmee een nauwkeurig meetresultaat mogelijk is (zie figuur 4.2).
2. Een mobiele sensor die zich beweegt over een gebied waar een continu elektrisch veld in is aangebracht. De methode is minder nauwkeurig maar werkt sneller en is dus voordeliger.
3. Metingen worden verricht met kettingsensoren in peilbuizen. Op een bepaalde plaats wordt een puls afgegeven aan de bodem. Met sensoren op verschillende diepten wordt het signaal geregistreerd. De methode kan mogelijk meer informatie geven over de diepte van een lekkage of afmetingen van constructieonderdelen in verticale richting (zie figuur 4.3).



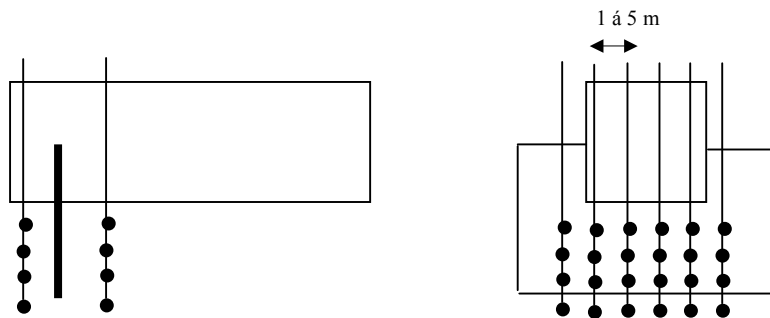
Figuur 4.2: schematisering en uitvoering van de EFT methode [2]

Voor de detectie van kwelschermen en lekken in kwelschermen onder een constructie (bijvoorbeeld een sluis) zijn er twee problemen:

1. Een raster van sensoren is alleen naast de sluis mogelijk. Uitgaande van een doorlopend kwelscherm tot onder de sluis is ook de plaats van het onderloopscherm hiermee bekend.
2. Om de lengte van een kwelscherm te kunnen bepalen is juist de derde dimensie, diepte, van belang. Alleen door toepassing van kettingsensoren is hier uitspraak over te doen. Toepassing van deze methode vindt dit jaar (2005) voor het eerst plaats bij het aanbrengen van damwanden in kleilagen voor de aanleg van de Noord-Zuidlijn in Amsterdam. [1]

De ECR- en EFT-methode zijn beide toepasbaar bij alle soorten damwandmateriaal. Tot nu toe zijn de methoden toegepast in gevallen waarbij grote risico's speelden. De kosten zijn namelijk relatief hoog. Evenals bij het gebruik van peilbuizen wordt ook bij deze methoden het effect van een kwelscherm waargenomen. In dit geval gaat het om de beïnvloeding van de grondwaterstroming. Het succes van de ECR/EFT-techniek bij toepassing op onder en achterloopsheid zal berusten op de mate waarin de stroming rond de schermen afwijkt van de natuurlijk aanwezige grondwaterstroming, in richting en grootte. [3]

ECR en EFT zijn, zoals vermeld, beide toepasbaar als lekdetectiemiddel. De methoden zijn duurder en vereisen een ingewikkelder meetopstelling dan peilbuizen maar kunnen beter inzicht geven in de plaats van een lekkage. De ECR/EFT techniek geeft een beter inzicht in de stroming van het grondwater. In plaats van de registratie van de grondwaterdruk wordt immers direct de stroming gedetecteerd. Alleen met de nog in ontwikkeling zijnde kettingsensormethode (figuur 4.3) kan de plaats van een lek in verticale zin (diepte) worden vastgesteld.



*Figuur 4.3: kettingsensormethode, zij- en vooraanzicht van een constructie met kwelscherm*

Een nadeel bij de toepassing onder een waterkerend kunstwerk is het meten onder water (als wordt uitgegaan van het niet droog mogen zetten van een sluis). Installatie van de apparatuur onder water en aanbrengen van sensoren onder de sluisvloer vraagt om (veel) boringen door de vloer heen. Nog afgezien van hinder voor de scheepvaart is dit, vanwege veiligheid en kosten, niet aan te bevelen.

## 4.4 Radar

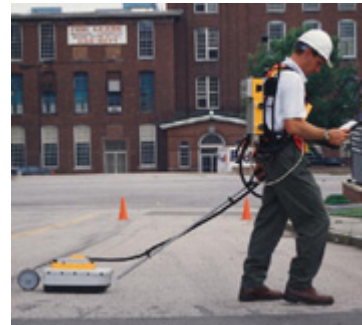
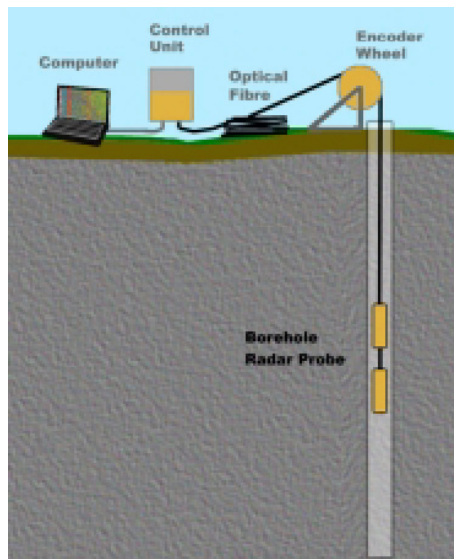
### 4.4.1 Grond- en oppervlakteradar

Grondradar en oppervlakteradar zijn beide gebaseerd op het uitzenden en ontvangen van elektromagnetische radiogolven. [4] Uit het teruggekaatste signaal is informatie af te leiden over bijvoorbeeld de opbouw van de bodem en in de bodem aanwezige constructies of voorwerpen. Radartechnologie is bruikbaar voor de bepaling van de plaats en de diepte van kwelschermen.

De oppervlakteradar (figuur 4.4, rechter afbeelding) is een eenvoudige methode die snel inzicht kan geven in bodemopbouw en aanwezigheid van kwelschermen. Een nadeel van de methode is de beperkte diepte tot waar deze toepasbaar is. Bepalend hierbij zijn de grondsoort, de grondwaterstand en de vereiste nauwkeurigheid die moet worden behaald. In het algemeen geldt dat bij meting tot grotere diepte een lagere frequentie gebruikt moet worden, en dat daarmee de nauwkeurigheid daalt.

Grondradar (figuur 4.4, linker afbeelding) berust op dezelfde principes als een oppervlakteradar. Het verschil is dat nu zender en ontvanger via een boorgat in de grond worden gelaten. De zender en de ontvanger bevinden zich op een vaste afstand van elkaar en zijn via een glasvezelkabel verbonden met een verwerkingsunit. De frequentie van de gebruikte straling is hetzelfde als bij oppervlakteradar en loopt van 20 tot 900MHz. Het voordeel boven de eerder genoemde oppervlakteradar methode is

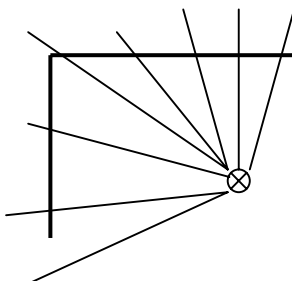
dat bij gebruik van een boorgat tot een veel grotere diepte gemeten kan worden, zonder verlies aan nauwkeurigheid. [5]



*Figuur 4.4: overzicht meetopstelling boorgatradar en gebruik oppervlakteradar[5]*

De methode is toepasbaar in de meeste grondslagen. Problemen ontstaan pas door de aanwezigheid van grondwater zoals in bodemmaterialen als veen en klei. Hier bestaat echter de mogelijkheid tot het toepassen van de iets gewijzigde methoden tomografie en oppervlakte tot boorgat meting. Deze worden in de paragrafen 4.4.2 en 4.4.3 behandeld. Waarschijnlijk is toepassing van deze methoden echter niet nodig, omdat het hier niet pipinggevoelig bodemmateriaal betreft. Metingen in brak en zout grondwater zijn als gevolg van de nog betere geleidbaarheid niet uitvoerbaar.

Het succes van de methode is afhankelijk van het verschil in geleidbaarheid tussen het waar te nemen object en zijn omgeving. [6] In zand is detectie van stalen, houten en betonnen schermen goed mogelijk. Evenals bij oppervlakteradar geldt: hoge frequenties leveren een nauwkeuriger meting maar dempen eerder uit, lage frequenties leveren een grovere meting met een groter bereik. [4] Toepassing in Nederland heeft onder andere plaatsgevonden bij de bepaling van de lengte van houten damwanden onder een bestaand kunstwerk in Hasselt, dijkkring Vollenhove. [7] Bij stalen damwanden is het veel voordeliger gebruik te maken van een magnetometer (zie paragraaf 4.6.)

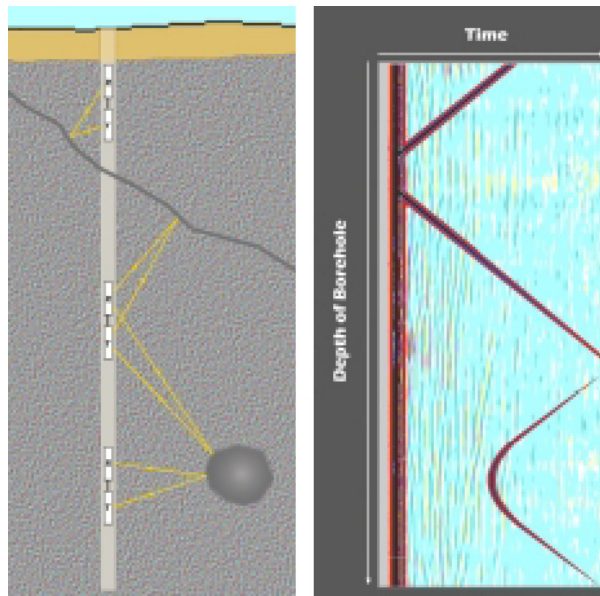


*Figuur 4.5: horizontale doorsnede over grondradar en twee wanden, loodrecht op het boorgat.*

Een probleem bij de boorgatradar methode is dat de radar slechts 1 dimensie (afstand) waarneemt. De ontvanger krijgt straling uit een gebied 360° rondom het apparaat. In

bepaalde situaties kan dit problemen opleveren. Bij twee constructies die een hoek met elkaar maken, is niet vast te stellen welke constructie waargenomen wordt (zie figuur 4.5). Bij een meting vanuit één boorgat kan de richting van een waargenomen voorwerp ten opzicht van het meetinstrument namelijk niet worden bepaald.

Voor toepassing van de methode moeten boorgaten gemaakt worden met een doorsnede van minimaal 55mm. Dit is mogelijk met klein materieel, zoals een pulsboormachine. Boorgaten hoeven niet persé verticaal te zijn, de boogtradar kan ook via een schuin boorgat worden aangebracht. Hiermee kan een boring door een sluisvloer wellicht worden voorkomen (zie figuur 4.11).



Figuur 4.6: meting en uitkomst met methode boogtradar [5]

De diepte van de benodigde boring is afhankelijk van de maximaal mogelijke lengte van de kwelchermen. Hierop komt een extra diepte als waarborg voor een goede uitvoering van de meting. Als regel wordt voor deze extra diepte aangehouden 1,5 maal de horizontale afstand van het boorgat tot het scherm. Deze afstand is afhankelijk van de grondslag en de vereiste nauwkeurigheid van de meting.

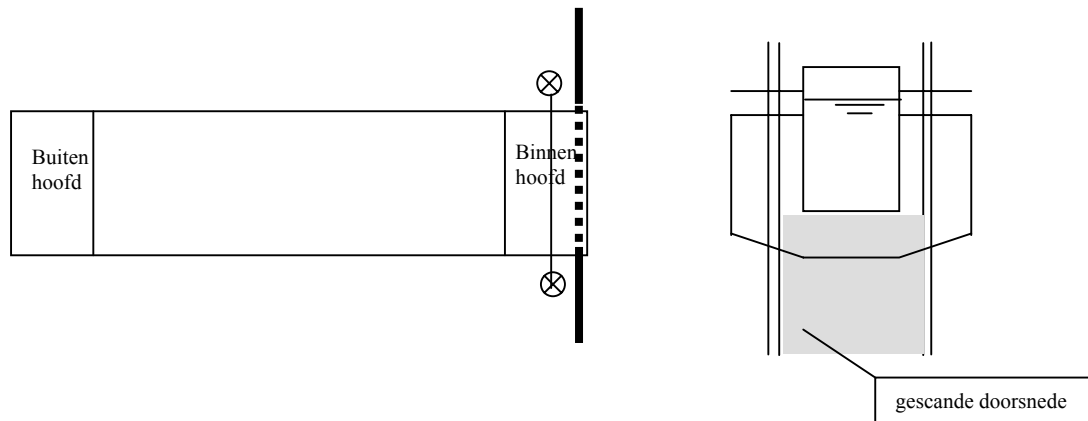
#### 4.4.2 Tomografiemethode

De tomografiemethode of cross-hole methode maakt gebruik van twee boorgaten voor ontvanger en zender afzonderlijk (zie figuren 4.7 en 4.8). Het verticale vlak tussen de boringen wordt gescand. Op deze manier ontstaat een afbeelding van de ondergrond tussen de boorgaten. De methode is bewerkelijker en tijdrovender dan de gewone grondradar methode. Het resultaat geeft echter meer inzicht in de opbouw van de bodem. De afstand tussen de twee boorgaten waarbij de methode nog werkt is sterk afhankelijk van de grondsoort en varieert tussen 10 en 100 meter. [5]

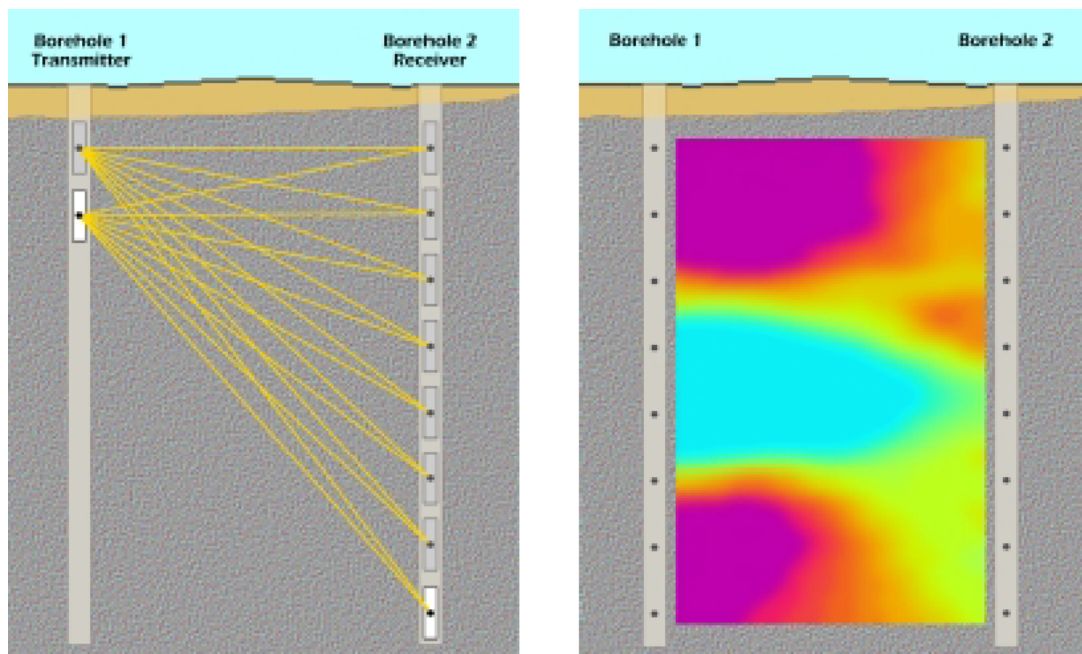
Met een radartomografie en een tracer is het mogelijk grondwaterstroming waar te nemen. [8] De methode is in voldoende doorlatende grondslagen toepasbaar. De boorgaten benodigd voor de installatie van de apparatuur kunnen aan weerszijden van de sluis worden aangebracht, waarna het vlak tussen de gaten onder de sluis wordt 'gescand'. Gaten door de sluisvloer zijn niet noodzakelijk. Door een scan vlak



voor of achter een scherm te maken is uitspraak te doen over lekkage en aansluiting van de schermen op de constructie.



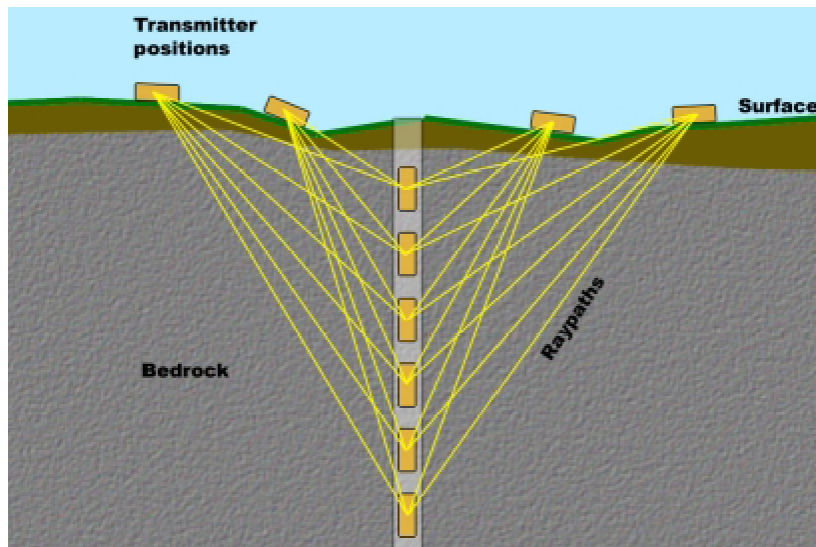
*Figuur 4.7: toepassing radartomografie, bovenaanzicht van een sluis en doorsnede loodrecht op de sluisas.*



*Figuur 4.8: uitvoering en resultaat tomografiemethode [5]*

#### **4.4.3 Oppervlakte tot boorgat methode**

Bij deze methode bevindt alleen de ontvanger zich in een boorgat (zie figuur 4.9). De diepte van de ontvanger wordt steeds veranderd. De zenders bevinden zich op het maaiveld aan weerszijden van het boorgat. De afstand van de zenders tot het boorgat wordt ook steeds veranderd. Het resultaat is een afbeelding, van een vlak in de bodem rond het boorgat.

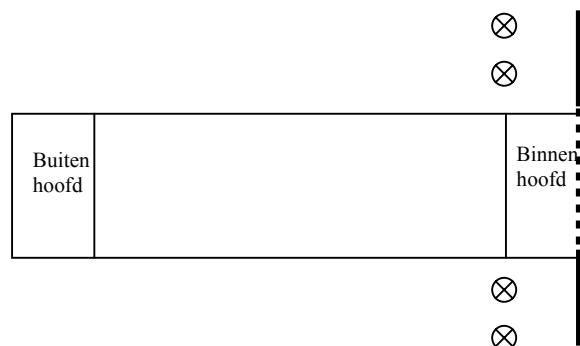


Figuur 4.9: uitvoering oppervlakte tot boorgat meting [5]

Voor het onderzoek naar de aanwezigheid van kwelchermen is de oppervlakteradar eigenlijk al voldoende. Een tomografiemethode (figuur 4.8) kan worden gebruikt, maar is meer van toepassing op onderzoek naar bodemopbouw. Een boorgatradar kan worden toegepast bij de lengtebepaling van de schermen. In het vervolg worden alle beschikbare methoden geschaard onder de term radar.

#### 4.5 Seismiek

Seismische methoden zijn gebaseerd op het afbeelden van de ondergrond met behulp van akoestische signalen die reflecteren op overgangen in de bodem. Deze overgangen kunnen laagovergangen zijn, maar ook de overgang tussen een constructieonderdeel en de ondergrond. [6] Hoewel sprake is van een redelijk grove methode behoort het aantonen van kwelchermen onder en naast een constructie wel tot de mogelijkheden. Door middel van een kleine explosie worden (geluids)golven opgewekt, die na reflectie worden waargenomen (zie figuur 4.10). Het signaal komt tot diep in de grond (ca. 1km). De methode wordt o.a. gebruikt bij de opsporing van olievelden. De uitvoering van de methode als middel bij de lengtebepaling van schermen kan met behulp van buizen in boorgaten, maar ook via een sondering met een seismische conus.



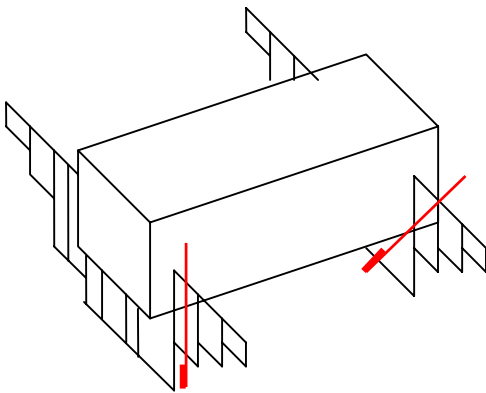
Figuur 4.10: bovenaanzicht sluis met boorgaten voor seismische methode. In één van de gaten vindt een explosie plaats, waarna sensoren in de andere gaten de trilling registreren.

#### 4.6 Magnetometer

Een magnetometer is een apparaat dat verstoringen van het aardmagnetisch veld waar kan nemen. Hoe de techniek benut wordt hangt af van wat men waar wil nemen. Toepassing vindt plaats bij het zoeken naar scheepswrakken, ondergrondse constructies en kabels en leidingen.

Voor toepassing bij de bepaling van de lengte van kwelschermen is de methode eveneens geschikt. Toepassing blijft echter beperkt tot de materialen staal en beton. De laatste is slechts vanwege het gebruik van wapeningsstaal te detecteren. Als sprake is van bijvoorbeeld een ongewapende onderwaterbeton vloer kan deze met een magnetometer niet worden waargenomen. De methode is niet effectief op het gebied van het opsporen van kwelschermen.

De eenvoudigste methode is het sonderen met een magnetometer. In plaats van een normale sondeerconus wordt een conus met magnetometer de grond in gedrukt. Aangezien een stalen kwelscherm en een scherm van gewapend beton een behoorlijke verstoring van het aardmagnetisch veld veroorzaken zijn deze goed waar te nemen. Het sonderen gebeurt meestal op een afstand van ca. 2 á 3 meter van de damwand. [7+9] Voor het bepalen van de lengte van een onderloopsheidscherm is het voldoende een sondering vlak langs de sluiswand te maken. Het maken van een gat in de sluisvloer voor een sondering midden onder de sluis is niet nodig (zie figuur 4.11). Ook het niveau van de bovenkant en onderkant van het kwelscherm is met een magnetometersondering te detecteren. Om de configuratie van de wand in beeld te brengen is uiteraard wel meer dan één sondering nodig.



*Figuur 4.11: sondering met een magnetometer vlak naast de constructie, ter beoordeling van de lengte van het onderloopsheidscherm en het eerste deel van het achterloopsheidscherm. Zowel verticaal als onder een hoek boren en meten is mogelijk.*

#### 4.7 Betontester

Deze methode wordt gebruikt bij het beoordelen van de kwaliteit van heipalen, nadat deze zijn geheid. De werking berust op een trilling die wordt doorgegeven. Bij een scheur in een paal en aan het einde van de paal kaatst het signaal terug. Met de bekende lengte van de paal kan bepaald worden of deze ongeschonden is ingebracht. De methode kan alleen worden toegepast bij harde materialen, in dit geval staal en beton.

Bij toepassing als methode voor lengtebepaling van damwanden zijn er twee moeilijkheden:

1. Bij heipalen is sprake van een signaal dat in 1 dimensie wordt doorgegeven, bij wanden is sprake van een 2-dimensionale voortplanting en reflectie [6].
2. Onderloopsheidschermen bevinden zich meestal onder een betonconstructie (gevuld met water) en zijn voor deze methode dus niet bereikbaar. De bovenkant van achterloopsheidschermen kan door graven wel blootgelegd worden, waarna de betontester-methode gebruikt kan worden. Het is echter niet aan te bevelen de bodem boven en rond het kwelscherm te 'roeren'. De pipinggevoeligheid neemt dan immers toe.

Toepassing van deze methode bij kwelschermen of damwanden is niet bekend.

#### **4.8 Camerasonde**

Voor de volledigheid wordt ook de camerasonde besproken. Met een camera in de grond kan slechts worden waargenomen wat zich direct voor de lens bevindt. Verder kijken gaat (tot nu toe) niet. Misschien kan door het waarnemen van de richting van de grondwaterstroming (eventueel m.b.v een tracer) rond de camera iets gezegd worden over de plaats waar een kwelscherm eindigt. De stroming zal zich hier concentreren en ook meer horizontaal gericht zijn. Langs het scherm verloopt de stroming verticaal. Ook een lek zou in principe op deze manier opgespoord kunnen worden. De methode wordt dan echter erg bewerkelijk.

Bij onderloopsheidschermen speelt het probleem van de slechte bereikbaarheid. Ook hier is het bepalen van de lengte van de schermen vlak langs de constructie als indicatie voor de lengte van de schermen onder de constructie een mogelijkheid, evenals schuin aanbrengen van de apparatuur (zie figuur 4.11).

#### **4.9 Thermische methoden**

De op temperatuurverschil gebaseerde methoden worden reeds jaren met succes toegepast, met name bij kwel door dijken en dammen. Stroming van grondwater is gekoppeld aan extra transport van warmte en leidt tot beïnvloeding van de temperatuur van de bodem en de doorstroomde gebieden. De temperatuur van de stroming is dus een tracer, omdat deze een andere temperatuur heeft dan de niet-beïnvloede bodem.

Uitvoeren van een meting is relatief eenvoudig. Na aanbrengen van een holle buis in de bodem, wordt een meetkabel met meerdere temperatuursondes, de bodem in gevoerd. Na enige tijd wordt op deze plaats de bodemtemperatuur bij alle sensoren tegelijk gemeten. Meten tot een diepte van ca. 30 meter beneden maaiveld is goed mogelijk. Voor een duidelijk stromingsbeeld rond een kunstwerk zijn meerdere boringen noodzakelijk.

Wil de methode toepasbaar zijn moet er een natuurlijk of kunstmatig aangebracht verschil zijn tussen het stromende en stilstaande water. Dit is bijvoorbeeld het geval bij verticale grondwaterstroming tussen lagen op verschillende diepte. Dieper grondwater heeft een lagere temperatuur en kan bij stroming naar een hogere laag worden gedetecteerd. Als sprake is van zeer lage stroomsnelheden is uitwisseling van warmte tussen stroming en omgeving een factor die nauwkeurig meten in de weg staat.



#### 4.10 Tracer

De in dit rapport besproken methoden zijn continu in ontwikkeling. Ook worden nog steeds nieuwe technieken ontwikkeld die direct inzetbaar zijn voor de pipingproblematiek. Ook uit een andere vakgebied komen soms methoden voort die (na aanpassing) gebruikt kunnen worden in de Civiele Techniek.

Eén van die methoden, Tracer, is zeker de moeite waard om te bespreken. De techniek is ontwikkeld door het bedrijf Groundtracer [4] en berust op detectie van elektrische potentiaalverschillen aanwezig in de bodem. Reeds van nature is de verdeling van lading in de ondergrond inhomogeen. In de bodem aanwezige voorwerpen kunnen deze ladingbalans echter danig verstoren. Door met gevoelige apparatuur deze minimale potentiaalverschillen (verstoringen) waar te nemen is een afbeelding van de ondergrond te maken waarin alle afwijkingen zichtbaar worden. Een probleem bij de methode is, dat niet zeker is wat de oorzaak is van een waargenomen verstoring.

Het grote voordeel van de methode is dat zelf geen signaal afgegeven hoeft te worden. Er wordt slechts vanaf maaiveld iets waargenomen dat reeds aanwezig is. Hoewel de methode nog niet uitvoerig is beschreven en gepubliceerd is ze al wel meermalen met succes toegepast, onder andere bij het ‘waarnemen’ van kwel door dijken.

Uiterlijk werkt tracer op dezelfde manier als een oppervlakteradar (en wordt hier ook vaak mee gecombineerd), qua techniek is de methode volledig anders. De techniek is uiterst gevoelig en kan zelfs door gewapend beton heen de ondergrond ‘waarnemen’, tot zeer grote diepte (ca. 100m).

Als toepassing bij de beoordeling van onder- en achterloopsheid bij kunstwerken is de techniek tot nu toe (november 2005) in Nederland slechts eenmaal toegepast. Dit gebeurde in het kader van dit afstudeerproject. De uitvoering en resultaten hiervan zijn terug te vinden in hoofdstuk 10.

#### 4.11 Literatuur

- [1] Dhr. B. Admiraal, Van Hattem en Blankevoort. Toepassing bij Noord-Zuidlijn te Amsterdam, voorjaar 2005 (mondeline communicatie)
- [2] Internetpagina Texplor GmbH, [www.texplor.com](http://www.texplor.com)
- [3] Dr. Ir. E. Slob, Faculteit Civiele Techniek en geowetenschappen, afdeling toegepaste geofysica (mondeline communicatie)
- [4] Dhr. Ing. D. Van der Roest en Dhr. Ir. M. van der Rijst. Groundtracer BV (mondeline communicatie)
- [5] Internetpagina Mala Geoscience; [www.malags.se](http://www.malags.se)
- [6] Dhr. Ing. J.W.M. Lambert, GeoDelft (mondeline communicatie)
- [7] Internetpagina Fugro, [www.fugro.nl](http://www.fugro.nl) en periodiek Fugro Info, jaargang 15, nr. 4, december 2004
- [8] Onderzoeksrapport: Borehole radar attenuation-difference tomography during the tracer/time-lapse test at the Boise hydro geophysical research site
- [9] Mondeline communicatie met Dhr. H. van den Berg, Fugro





## H5 Beoordeling van de meetmethoden

### 5.1 Detecteren van kwelschermen

Als uit tekeningen of overlevering niet achterhaald kan worden of kwelschermen onder een constructie zijn toegepast hangt het van de noodzaak af óf en met welke methode(n) men een onderzoek start.

Het verifiëren van de toepassing van schermen onder het kunstwerk en vervolgens het bepalen van de plaats van de schermen kan op twee verschillende manieren gebeuren:

- Interpretatie van de meetresultaten van een meting van de grondwaterstroming of grondwaterdruk onder en langs het kunstwerk.
- Een meting uitvoeren waarbij de bodem onder het kunstwerk als het ware wordt doorgelicht. De plaats van de schermen kan op deze manier direct bepaald worden.

Elke methode heeft zijn eigen toepassing en mate van nauwkeurigheid. Uit de analyse van grondwaterstroming zal de plaats van een kwelscherm niet altijd duidelijk blijken. De te behalen nauwkeurigheid blijkt in de orde van enkele meters te liggen. Een directe meting van wat zich onder de constructie bevindt is nauwkeuriger en geeft tevens de lengte van de schermen.

#### **5.1.1 Meetmethoden op basis van grondwaterstroming en grondwaterdruk**

Er zijn twee verschillende technieken bruikbaar. Een meting met peilbuizen waarmee de grondwaterdruk wordt gemeten en metingen op basis van ionentransport door de ondergrond. Voor deze laatste methode staan twee technieken ter beschikking, de ECR- en de EFT- methode. Bij een stijghoogtemeting wordt met peilbuizen de grondwaterdruk ter plaatse van het filter bepaald. Door op een aantal punten (en diepten) de stijghoogte te bepalen kan uitspraak worden gedaan over het verloop van de stijghoogte onder en/of naast de constructie. Eventueel aanwezige en functionerende kwelschermen worden waargenomen als een sprong in de verhanglijn.

De ECR- en EFT- methode geven de stromingsintensiteit en stromingsrichting aan. Uit een interpretatie van de meetresultaten kan vervolgens de plaats van eventueel aanwezige schermen worden bepaald. De EFT technologie is een aanvulling op ECR en zorgt dat de techniek breder inzetbaar is. Ook bij lage stroomsnelheden kan hiermee een goed resultaat worden behaald.

Met geen van de methoden is het mogelijk de lengte van de schermen te achterhalen. Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 5.2 lengtebepaling van kwelschermen.

#### **5.1.2 Meetmethoden voor directe tracerings van kwelschermen**

De twee meest geschikte methoden voor het direct 'waarnemen' van kwelschermen zijn grondradar en seismiek. Om met grondradar een kwelscherm te kunnen detecteren moeten op een aantal (strategische) plaatsen boorgaten worden gemaakt, zoals in de paragrafen 4.4 en 4.6 van hoofdstuk 4 is beschreven. Toepassing van de methode in klei en veen is slecht mogelijk. In brak of zout water kan niet betrouwbaar worden gemeten. Aangezien kwelproblemen vaak spelen bij niet-cohesieve grondslag (zand) is de methode toch vaak te gebruiken.

Ook seismiek werkt met instrumenten in boorgaten. Tevens is bij deze techniek een sondering met seismische conus mogelijk. Dit heeft het voordeel boven grondradar



dat het doen van dure boringen niet nodig is. Seismiek kan bovendien in elke grondslag worden toegepast. De methode is echter minder nauwkeurig dan grondradar. (nauwkeurigheid van ca. 1m versus een nauwkeurigheid van ca. 0,1m bij radar)

In tegenstelling tot de methoden berustend op grondwaterdruk en –stroming, wordt bij deze methoden de lengte van de schermen ook direct bepaald. Dit is uiteraard een groot voordeel omdat uit één meting veel informatie wordt verkregen.

### **5.1.3 Conclusie plaatsbepaling**

Als duidelijk moet worden waar kwelschermen onder een constructie zijn geplaatst is grondradar via boorgaten de meest nauwkeurigste methode. Hiermee worden plaats en lengte van de schermen bepaald. Detectie van houten, stalen en betonnen schermen is mogelijk. Toepassing in klei en veen is lastig. In zand levert de methode geen problemen. Geschiktheid hangt af van het verschil in geleidbaarheid tussen het te detecteren constructiedeel en de ondergrond. De te behalen nauwkeurigheid ligt in de orde 0,1m. Eventueel is schuin aanboren van onderdelen onder de sluisvloer mogelijk. Boren door de sluisvloer heen is in dit geval niet nodig.

Als een minder grote nauwkeurigheid (orde 1m) toelaatbaar is kan ook gekozen worden voor seismiek als methode voor detectie van de schermen. Het voordeel van deze methode is de toepassing via een sondering. Er hoeven geen boorgaten gemaakt te worden. De methode is in alle grondslagen en bij alle soorten kwelschermen toepasbaar. Achtergrondtrilling kan de methode echter danig verstoren. De diepte tot waar detectie mogelijk is, is veel groter dan bij radar en bedraagt enkele honderden meters.

Als indirecte methode is stijghoogtemeting met peilbuizen het meest efficiënt. De installatie van meetapparatuur blijft beperkt tot het aanbrengen van enkele peilbuizen rondom de constructie. Plaatsing van buizen door vloeren heen is, afhankelijk van het te meten verschijnsel, niet persé nodig. Als kwelschermen niet goed op de constructie aansluiten of lek zijn worden ze niet of niet duidelijk waargenomen. Dit is niet erg, het effect van deze schermen is in dit geval dus hetzelfde als geen scherm.

## **5.2 Lengtebepaling van kwelschermen**

### **5.2.1 Meetmethoden**

Als de plaats van de kwelschermen wél bekend is, of bekend is geworden na toepassing van een methode uit paragraaf 5.1, maar de lengte van de onder- en achterloopschermen niet, zijn er afhankelijk van het materiaal waarvan de schermen zijn gemaakt drie efficiënte mogelijkheden.

1. Bij stalen schermen of schermen van gewapend beton is een sondering met een magnetometer een snelle en goedkope methode. Met enkele sonderpunten zijn de lengte en configuratie van een scherm met grote nauwkeurigheid (ca. 0,1m) vast te stellen.
2. Bij houten schermen is de boorgatradar een goede methode. Ook hiermee kan op een snelle manier een oordeel over de lengte van de schermen worden gegeven.
3. Bij alle soorten schermen kan tevens een sondering op basis van seismiek worden toegepast.





### **5.2.2. Conclusie lengtebepaling**

Als onduidelijkheid bestaat over het toegepaste materiaal is een grondradar de beste meettechniek. Deze methode is immers toepasbaar bij alle damwandmaterialen en nauwkeuriger dan seismiek. De methode is echter een stuk duurder dan een sondering met een magnetometer. Meestal is wel duidelijk in welke periode een kunstwerk is gebouwd. Hiermee kan uitspraak worden gedaan over de gebruikte bouwmaterialen [1]. Als bekend is dat staal of gewapend beton is gebruikt is een sondering met een magnetometer de beste methode.

Afhankelijk van de vereiste nauwkeurigheid en het beschikbare budget moet uiteindelijk een methode worden gekozen.

## **5.3 Lekdetectie**

### **5.3.1 Meetmethoden**

Zoals eerder opgemerkt is een controle op de kwaliteit van een scherm slechts mogelijk door het blootgraven van de constructie. Deze situatie is, zeker bij een kwelvoorziening, niet gewenst. Pas als daadwerkelijk sprake is van een lekkage kan door meting iets worden waargenomen. Om water door te laten behoeft een lek niet groot te zijn. Dit vormt het voornaamste probleem voor de meeste van de besproken methoden. De nauwkeurigheid van de methoden is niet voldoende om uitspraak te kunnen doen over het wel of niet lekken van een kwel scherm.

De methoden om afbeeldingen van de ondergrond te maken, zoals grondradar en seismiek, vallen hierdoor af. Hoewel goed toepasbaar voor plaats en lengtebepaling is in dit geval de nauwkeurigheid niet voldoende. Hooguit dat een radartomografie met gebruikmaking van een tracer de stroming voor of achter een scherm zichtbaar kan maken (zie paragraaf. 4.4.2).

Lekdetectie in een verticaal scherm is per definitie een stromingsprobleem. Dus evenals in paragraaf 5.1 komen stijghoogtemeting en ECR/EFT in aanmerking. Nu is de ECR/EFT-techniek op te vatten als een meer directe methode. Immers de stroming door het gat wordt direct waargenomen. Bij een stijghoogtemeting wordt het lek afgeleid uit het aan weerszijden van het scherm (ongeveer) gelijk blijven van de waterdruk. De mate waarin dit gebeurt hangt uiteraard af van de grootte van het lek.

Een voordeel van de ECR- en EFT-methode is dat de locatie van het lek in horizontale zin beter is vast te stellen dan bij een stijghoogtemeting. Bij de meer geavanceerde toepassing van ECR/EFT met kettingsensoren (zie hoofdstuk 4 figuur 4.3) is bovendien mogelijk uitspraak te doen over de diepte waarop het lek zich bevindt. Dit is met stijghoogtemetingen niet mogelijk.

### **5.3.2 Conclusie lekdetectie**

Voor lekdetectie zijn drie methoden bruikbaar; stijghoogtemeting met peilbuizen, met waterspanningsmeters of gebruik van ECR/EFT. De locatie van het lek kan alleen met ECR/EFT goed worden bepaald. Peilbuizen en waterspanningsmeters geven slechts een indicatie over wel of niet lekken. Drukveranderingen als gevolg van snelle waterstandsfluctuaties kunnen het beste met een waterspanningsmeter worden waargenomen. [2]



De ECR- en EFT methode vereisen beide een installatie van veel apparatuur op lastige plaatsen. Buiten gebruik stelling van de sluis is niet te voorkomen. Ook zullen boorgaten door de sluisvloer gemaakt moeten worden. De kosten en de praktische problemen worden bij toepassing van deze methoden waarschijnlijk snel te groot.

#### 5.4 Literatuur

- [1] Historische sluizen en stuwen, waardering en instandhouding, Stichting Matrijs, Utrecht 2004, G.J. Arends;  
Sluizen en stuwen: De ontwikkeling van de sluis- en stuwbouw in Nederland tot 1940, Delftse Universitaire Pers 1994, G.J. Arends
- [2] Grondmechanisch onderzoek Sluiscomplex Sambeek, Mos  
Grondmechanica juni 1999 en Bouwdienst rijkswaterstaat



## Deel III Casestudy

<b>H6 Meetplan Zuidersluis</b> .....	<b>31</b>
6.1 Inleiding .....	31
6.2 Bodemopbouw en bouwwijze.....	31
6.2.1 Bodemopbouw .....	31
6.2.2 Waterstanden.....	32
6.2.3 Bouwwijze .....	32
6.3 Kwelweganalyse .....	32
6.3.1 Beschrijving van de constructie .....	32
6.3.2 Kwelwegen .....	34
6.4 Instrumentarium en plaatsing.....	36
6.4.1 Instrumentarium.....	36
6.4.2 Plaatsing.....	36
6.5 Kosten van het meetprogramma .....	40
6.6 Literatuur.....	40
<b>H7 Hypothesen en opzet van verwerking peilbuismeting</b> .....	<b>41</b>
7.1 Inleiding .....	41
7.2 Hypothesen .....	41
7.2.1 Grondwaterstroming .....	41
7.2.2 Theoretisch stijghoogteverloop.....	42
7.2.3 Tijdsafhankelijkheid .....	43
7.3 Verwerking meetgegevens.....	44
7.3.1 Inleiding .....	44
7.3.2 Diagram van de stijghoogte per buis .....	44
7.3.3 Vergelijking van stijghoogte tussen de buizen onderling.....	45
7.3.4 Symmetrie en richting.....	46
7.4 Schutproces .....	46
7.5 Voorbereiding .....	47
7.5.1 Beschrijving van de pulsboortechniek .....	47
7.5.2 Uitvoering van de boringen .....	48
7.5.3 Verwijderen van de buizen .....	49
7.6 Literatuur.....	49
<b>H8 Meetresultaten en uitwerking</b> .....	<b>51</b>
8.1 Inleiding .....	51
8.2 Verwerking ruwe gegevens.....	51
8.3 Verhang.....	52
8.3.1 Verhanglijn .....	52
8.3.2 Fluctuaties in de stijghoogte .....	54
8.3.3 Conclusie op basis van verhanglijn.....	55
8.4 Stijghoogteverloop in detail.....	56
8.4.1 Waterstanden.....	56
8.4.2 Buitenhoofd.....	57
8.4.3 Schutkolk .....	59
8.4.4 Binnenhoofd.....	60
8.5 Invloed van de keileemlaag op het verhang.....	63
8.5.1 Inleiding .....	63



8.5.2 Analyse .....	63
8.5.3 Tweedimensionale analyse met M-seep .....	67
8.5.4 Sliblagen .....	68
8.6 Literatuur.....	68
<b>H9 Resultaten van meting met hogere frequentie.....</b>	<b>69</b>
9.1 Aanpassingen .....	69
9.2 Resultaten van de aangepaste metingen.....	69
9.3 Invloed legen en vullen van de kolk op de stijghoogte.....	72
9.4 Conclusie.....	75
9.5 Literatuur.....	75
<b>H10 Radar en tracer; uitkomsten en toepassing.....</b>	<b>77</b>
10.1 Uitvoering .....	77
10.2 Uitwerking en resultaten .....	78
10.3 Mogelijke verklaringen.....	80
10.4 Toepassingspotentie .....	80



## H6 Meetplan Zuidersluis

### 6.1 Inleiding

Op de bijzondere locatie De Blocq van Kuffeler nabij Almere in de provincie Flevoland zijn een gemaal en een schutsluis aanwezig. Beide kunstwerken zijn onderdeel van dijkkring 8. Op grond van de Wet op de Waterkering van 1995 moet elke beheerder om de vijf jaar verslag uitbrengen van de waterstaatkundige toestand van de primaire waterkering. Voor de locatie De Blocq van Kuffeler is dit voor de eerste maal gebeurd in 1996. Na een toetsing volgens de Leidraad Toetsen op Veiligheid (LTV) [1] bleken beide kunstwerken niet te voldoen. Bij een latere (geavanceerde) toetsing op piping was het oordeel voor beide wel voldoende.

Voor de tweede toetsronde (2001-2006) op basis van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV) [2] wil men meer kennis verkrijgen over de toestand van de sluis. Met name de veiligheid van het kunstwerk op het onderdeel piping is nog steeds niet duidelijk. In plaats van een theoretische toetsing volgens de methode van Lane en een controle op heave (welke in dit geval worden voorgeschreven door het Technisch rapport Zandmeevoerende wellen [3]) is men meer geïnteresseerd in een praktische benadering. In dit hoofdstuk wordt een meetplan gepresenteerd waarin dit wordt uitgewerkt.

De praktische benadering van het onderzoek aan het faalmechanisme piping bestaat uit het plaatsen van peilbuizen en/of waterspanningsmeters. De opzet van de meting en aspecten als plaatsing, diepte, meetduur en frequentie worden in dit hoofdstuk besproken. Voor de methode peilbuizen is gekozen naar aanleiding van de conclusies in hoofdstuk 5 omtrent het gebruik van indirecte detectiemethoden. Bij een controle op het functioneren van schermen is dit de meest efficiënte methode.



Figuur 6.1: ligging van locatie De Blocq van Kuffeler

### 6.2 Bodemopbouw en bouwwijze

#### 6.2.1 Bodemopbouw

De gegevens over de bodemopbouw zijn overgenomen uit de Toets bijzondere locatie De Blocq van Kuffeler [4] uitgevoerd door Royal Haskoning in oktober 2002. Het grondonderzoek [5] dat voor dit rapport is uitgevoerd is verricht door Fugro. Uit een

boring tot NAP-12,50m op ca. 30 meter uit de as van de sluis volgt dat ter plaatse van de sluis overwegend zand aanwezig is (boring B1, bijlagen 2 en 3). Dit zand varieert van zeer grof tot zeer fijn. Over de gehele diepte is het zand zwak siltig. Op een aantal diepten komen kleilensjes voor. Het Pleistocene zand begint volgens [4] op een diepte van ca. NAP-11m. Op enige afstand van de sluis (boring B2, bijlagen 2 en 3) bestaat de (ongeroerde) bodem overwegend uit klei- en veenlagen, afgewisseld met zand.

Het uitgangspunt voor de metingen is een ten opzichte van de sluisas symmetrische bodemopbouw.

### **6.2.2 Waterstanden**

Het toetspeil is eveneens afkomstig uit [4] en berekend met Hydra M. Afgerond is dit NAP+0,65m. Het streefpeil van het Markermeer bedraagt NAP-0,20m in de zomer en NAP-0,40m in de winter. Op de locatie De Blocq van Kuffeler geldt een significante golfhoogte van 2,5m [6]. Omdat sprake is van een kortdurende belasting wordt dit niet meegenomen in de toets op piping.

Aan de polderzijde van sluis en gemaal is sprake van twee polderpeilen, een hoog en een laag peil. Aan de oostzijde van het gemaal is een polder waar een peil van -6,2m wordt gehandhaafd, aan de westzijde is het polderpeil -5,2m, dus een meter hoger. De scheiding tussen de peilen is in de omgeving van het gemaal gerealiseerd door een damwandscherm (zie ook paragraaf 7.2).

De Zuidersluis bevindt zich in de polder met streefpeil NAP-5,2m. Uit informatie van het waterschap Zuiderzeeland blijkt dit peil te variëren tussen NAP-5,10m en NAP-5,20m, zodat NAP-5,20m het minimum polderpeil is.

Het maatgevende verval over de sluis is derhalve  $\text{NAP}+0,65\text{m} - \text{NAP}-5,20\text{m} = 5,85\text{m}$ .

### **6.2.3 Bouwwijze**

De sluis (en het gemaal) op de locatie De Blocq van Kuffeler zijn gebouwd in de jaren zestig in een open bouwput. Dit betekent dat middels een ringdijk en een bemaling een kleine polder werd gemaakt waarin de kunstwerken zijn gebouwd. Na aanvullen van de constructie (aansluiting op dijk) en wegbaggeren van de tijdelijke ringdijk werden sluis en gemaal operationeel. De gebruikte bouwwijze betekent dat de aanvulling tussen dijk en kunstwerk bestaat uit geroerde grond. Meestal wordt de grond gebruikt die vrijkomt bij het graven van de bouwkuip. Van de originele bodemopbouw zal in de directe omgeving van de sluis in ieder geval geen sprake meer zijn. Uit [4] volgt dat na de aanleg van de sluis de bodem direct naast de constructie is aangevuld met zand. Dit wordt bevestigd door de uitgevoerde boringen. [5]

## **6.3 Kwelweganalyse**

### **6.3.1 Beschrijving van de constructie**

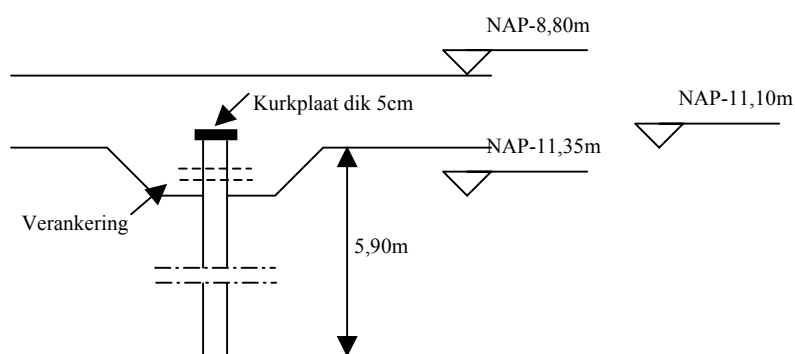
De Zuidersluis is gebouwd in de jaren zestig en maakt scheepvaart mogelijk tussen de Hoge Vaart in Flevoland en het Markermeer. Het gaat om een sluis met een totale lengte van 111,35m, geschikt voor schepen tot en met klasse II. Tegenwoordig is voornamelijk sprake van recreatievaart. De kolk lengte is 63,65m, de doorvaartbreedte



is 8,54m. De sluis is uitgevoerd in gewapend beton en gefundeerd op palen. De sluis is zoals eerder vermeld gebouwd volgens het principe van een open bouwput. Voor een schets van de sluis wordt verwezen naar figuur 6.3 op de volgende pagina.

De bovenkant van het buitenhoofd ligt op NAP+3,0m. De bovenkant van het binnenhoofd ligt op NAP+2,65m. De doorvaartbreedte van de sluis is 8,54m. Het niveau van de onderkant van de kolkvloer is overal NAP-11,10m. De dikte van de vloer verloopt van 1,20m onder het buitenhoofd tot 2,30m onder het binnenhoofd. Onder de sluis bevinden zich 4 kwelschermen, twee onder elk sluishoofd. Ter plaatse van de aansluiting tussen de sluisvloer en de kwelschermen is een nokje geconstrueerd. De ruimte tussen de bovenkant van het scherm en het beton is opgevuld met 5cm kurk. Normaalgesproken gebeurt dit enkel bij op staal gefundeerde constructies om kunstwerk en damwand los van elkaar te laten bewegen en een waterdichte afsluiting te maken (zie figuur 6.2).

De Zuidersluis is gefundeerd op palen. Het is derhalve te verwachten dat de damwanden zijn verankerd in de constructie, om uitzakken als gevolg van negatieve kleeft te voorkomen. Omdat funderingstekeningen niet zijn achterhaald, kan dit echter niet worden geverifieerd.



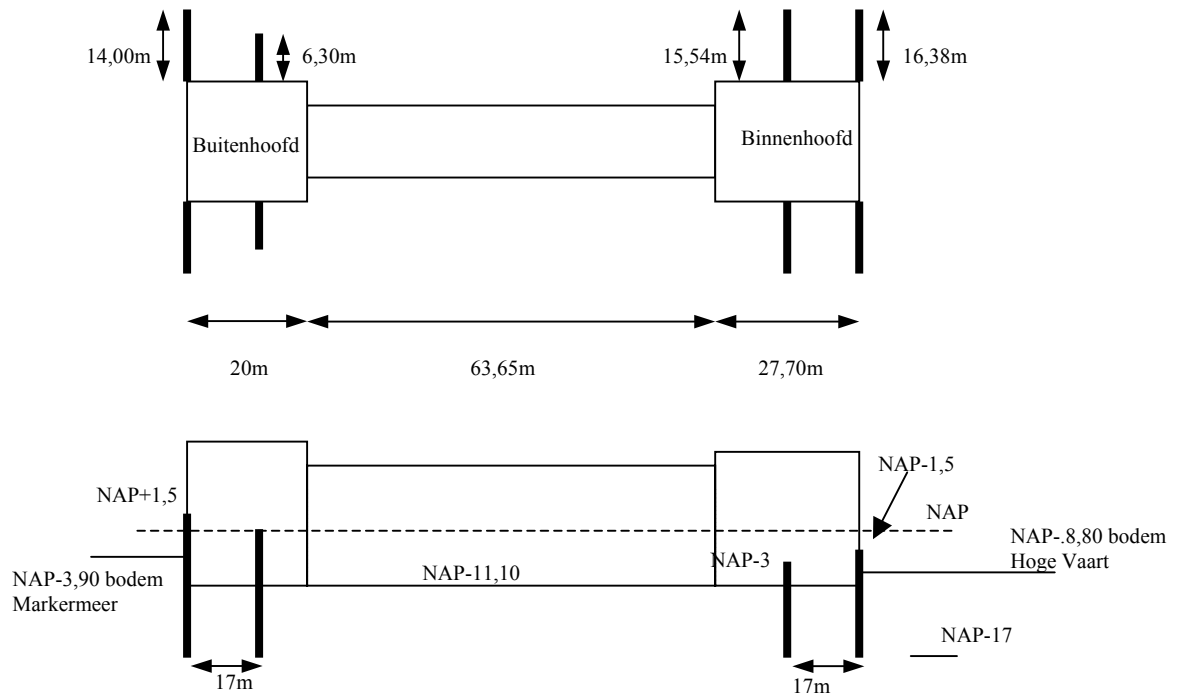
*Figuur 6.2: aansluiting onderloopscherm op betonconstructie, een waterafdichting (kurkplaat) is bij een palenfundering ongebruikelijk.*

De vier onderloopschermen zijn 6 meter lang en reiken over de volledige breedte van de sluis tot een niveau NAP-17,00m. Voor een overzicht van de configuratie van de onder- en achterloopschermen wordt verwezen naar bijlage 4.

Naast het buitenhoofd zijn achterloopschermen aanwezig die aansluiten op de onderloopschermen. Het buitenste scherm is tevens grondkering en loopt door tot 14 meter naast het buitenhoofd, met de bovenkant van het scherm op niveau NAP+1,50m. Het tweede scherm van het buitenhoofd loopt aan weerszijden door tot 6,30m buiten de constructie, met een bovenkant op NAP.

Naast het binnenhoofd zijn eveneens achterloopschermen aanwezig. Het meest zuidelijk gelegen scherm (polderzijde) is tevens grondkering en loopt aan weerszijden tot 16,38m buiten het binnenhoofd, met een bovenkant op NAP-1,50m. Het andere scherm (kolkzijde) loopt tot 15,54m buiten het hoofd, met een bovenkant op NAP-4,00m. Zowel bij het binnen- als het buitenhoofd bedraagt de afstand tussen de schermen 17 meter. De grondkerende (buitenste) schermen worden met ankers door

de binnenste schermen gesteund. Een overzicht van de aanwezige schermen is gegeven in figuur 6.3.



Figuur 6.3: schematisatie bovenaanzicht en zijaanzicht sluis met schermen. Niet op schaal.

De achterloopsheidschermen reiken niet overal even diep, maar zijn getrapt. Voor een overzicht van de damwandlengten wordt nogmaals verwezen naar bijlage 4 en [4].

### 6.3.2 Kwelwegen

Om inzicht te verkrijgen in de manieren waarop het water onder de sluis door en langs de sluis heen kan is een analyse gemaakt van de mogelijke kwelwegen. Hierbij is gewerkt volgens de methodiek uit het Technisch rapport Zandmeevoerende wellen [3]. Verschillende wegen zijn gecombineerd om tot de theoretisch kortste kwelweg te komen.

In bijlage 5 is een overzicht gegeven van mogelijke kwelwegen onder en langs de sluis. Omdat sprake is van een symmetrische plaatsing van schermen ten opzichte van de sluisas wordt geen onderscheid gemaakt tussen west en oostzijde van de kolk. De maatgevende totale kwelweg bestaat uit een horizontaal deel van 48,60 meter en een verticaal deel van 9,5 meter en wordt theoretisch getoetst met de regel van Lane:

$$\Delta H \leq \Delta H_c = \frac{(\alpha L_h + L_v)}{C_{w,creep}}$$

Met daarin:

$\Delta H$  = maatgevend verval over de kering

$\Delta H_c$  = kritieke verval over de kering

$C_{w,creep}$  = Creep-factor volgens Lane

$\alpha$  = 1/3, bij goede aansluiting tussen constructie en ondergrond

$\alpha$  = 0, bij constructies gefundeerd op palen (i.v.m. zettingsspleet)



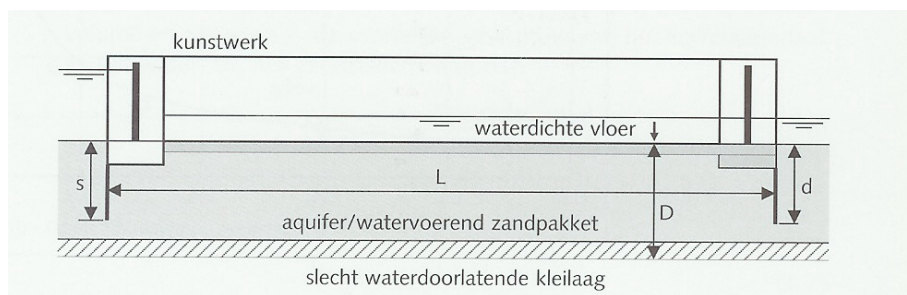
Voor de maatgevende kwelweg (kwelweg D uit bijlage 5) wordt gevonden:

$$\Delta H \leq \Delta H_c = \frac{\left(\frac{1}{3} \cdot 48,60m + 9,5m\right)}{C_{w,creep}} = \frac{25,70m}{C_{w,creep}}$$

Kwelwegen door de spleet tussen constructie en ondergrond ( $\alpha = 0$ ) zijn hierbij achterwege gelaten.

Het maatgevende verval over de sluis bedraagt 5,85m. Met een creepfactor verlopend van 7 tot 5 (zeer fijn tot zeer grof zand) wordt een kritiek verval van 3,7m tot 5,1m gevonden. Zelfs voor grof zand is het oordeel van de toets volgens de regel van Lane onvoldoende. Over de toepassing van een bodembescherming (met filteropbouw) is niets bekend, de benodigde kwelengte kan derhalve niet worden verkleind en het oordeel blijft onvoldoende.

Omdat de constructie niet voldoet volgens de regel van Lane wordt zoals voorgeschreven in het VTV, een toets op heave uitgevoerd. Hierbij wordt voor een eerste indruk de eenvoudige situatie van een sluis met twee schermen beschouwd zoals weergegeven in figuur 6.4. Het mechanisme heave wordt toegelicht in bijlage 6.



Figuur 6.4: definitieschets heave

Met  $s = d = 8,20m$  (afstand onderkant scherm tot bodem Hoge vaart),  $D = 100m$  [1 en 6] en  $L = 111,35m$  zijn de volgende ratio's gevonden;

$$D/L = 0,9$$

$$d/D = 0,08.$$

Vervolgens wordt grafiek A.I.2 uit [3] afgelezen (zie bijlage 6) en volgt

$$\left(\frac{\Delta H}{L}\right)_{toelaatbaar} = 0,12$$

Hieruit volgt  $\Delta H_{toelaatbaar} = 13,3m$ . Dit is ruim tweemaal het maatgevende verval van 5,85m. De score op het mechanisme heave is dus voldoende.

Uit de beschikbare tekeningen is niet te achterhalen of aan de benedenstroomse zijde een laag met een dusdanige granulaire samenstelling aanwezig is dat er sprake is van een zanddichte filterconstructie.

## 6.4 Instrumentarium en plaatsing

### 6.4.1 Instrumentarium

In de hoofdstukken 4 en 5 is een inventarisatie uitgevoerd van mogelijke meetmethoden voor het detecteren en beoordelen van kwelschermen. Hier wordt geconcludeerd dat voor het onderdeel lekdetectie het gebruik van peilbuizen het meest efficiënt is. Opgemerkt wordt dat ook waterspanningsmeters gebruikt kunnen worden in plaats van peilbuizen. Toepassing hiervan is echter pas zinvol als snelle waterstandfluctuaties waargenomen moeten worden.

Voor het pipingonderzoek bij de Zuidersluis wordt gekozen voor peilbuizen. Het plaatsen van waterspanningsmeters wordt niet nodig geacht. Van fluctuaties in waterstanden, zoals getij, is op het Markermeer en in de Hoge Vaart geen sprake.

Omdat onderzoek wordt gedaan aan een statische situatie is een continue meting met automatische drukopnemers niet nodig. Het voldoet de peilbuizen een keer of vijf af te lezen, verspreid over een periode van twee weken. Hierbij moet rekening worden gehouden met de invloed van de waterstand in de kolk op de situatie naast de kolk. Om steeds dezelfde uitgangspositie te hebben wordt aanbevolen telkens af te lezen voor de eerste schutting, bij een zelfde waterstand in de kolk.

### 6.4.2 Plaatsing

Het doel van dit onderzoek is het verkrijgen van meer inzicht in onder- en achterloopsheid bij een waterkerend kunstwerk. In paragraaf 6.3 is een theoretische toetsing op piping en heave uitgevoerd met het doel een indruk te krijgen van de mogelijke kwelwegen. Aangezien in werkelijkheid sprake is van een driedimensionale situatie met allerlei onzekerheden, zal de praktijk behoorlijk kunnen afwijken van de theorie. Op basis van een controle met de regel van Lane voldoet de sluis niet op het onderdeel onder- en achterloopsheid.

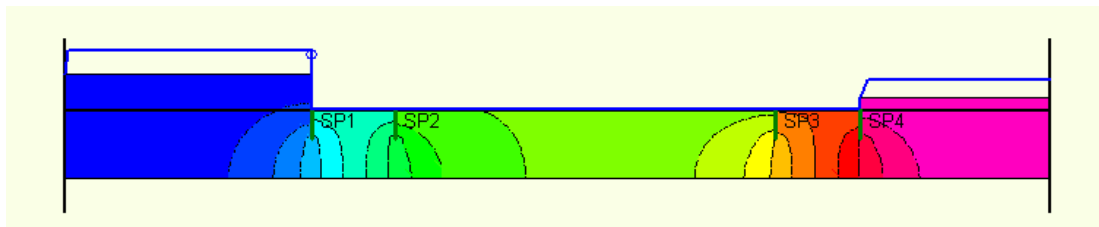
Door de sluis te toetsen op heave of een meer geavanceerde controle op piping uit te voeren kan het toetsresultaat alsnog positief uitvallen. Het blijft echter bij een theoretische toets, veelal zelfs tweedimensionaal.

In dit onderzoek wordt in plaats van een theoretische uitdieping een meer praktische benadering gekozen; een stijghoogtemeting met peilbuizen. Het doel is het verkrijgen van inzicht in de veiligheid van het kunstwerk tegen piping. Meer concreet betekent dit een controle van het verhang over de sluis. Uit een analyse van de verhanglijn kan bijvoorbeeld worden geconcludeerd of kwelschermen nog werken en of daadwerkelijk sprake is van een spleet tussen fundering en ondergrond. Ook kan een uitspraak worden gedaan over het uittreeverhang, een belangrijke parameter voor de controle op heave. Het verhang geeft in combinatie met het soort bodemmateriaal een indicatie van de veiligheid tegen piping.

Voor het construeren van de verhanglijn over de constructie is het nodig de grootte van de sprongen over de schermen te weten. De voorspelling is dat als gevolg van de spleet onder de op palen gefundeerde constructie het verhang tussen de schermen nagenoeg nul kan zijn. Een eenvoudige analyse met het computerprogramma M-seep ondersteunt deze hypothese. Opgemerkt wordt dat het hier om een tweedimensionale situatie in een vlak onder de sluis gaat (zie figuur 6.5). In een later stadium van het

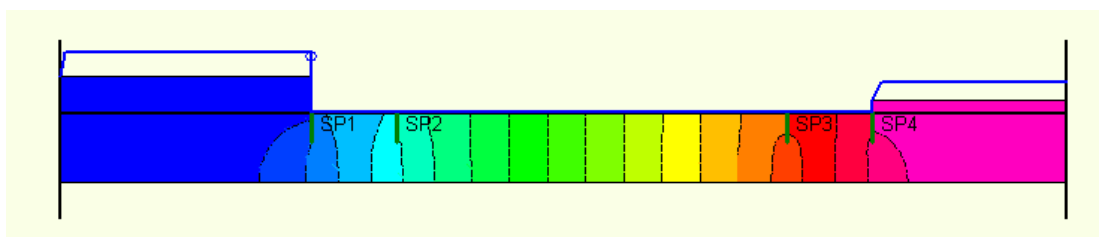


onderzoek kan overgestapt worden naar een driedimensionale variant, bijvoorbeeld EFD-lab. Voor een eerste indruk van de situatie voldoet M-seep. Als bodemmateriaal is gekozen voor zand met een horizontale en verticale doorlatendheid van  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s. De spleet tussen constructie en ondergrond is gemodelleerd als een laag grind van 20cm met een doorlatendheid  $k = 1 \cdot 10^{-1}$  m/s.



*Figuur 6.5: potentiaalijnen bij een spleet tussen constructie en ondergrond. Uitvoer M-seep.*

Als dezelfde geometrie en bodemopbouw worden beschouwd, maar nu zonder spleet onder de constructie volgt een meer geleidelijk verloop van de stijghoogte over de constructie (zie figuur 6.6).



*Figuur 6.6: potentiaalijnen bij homogene grondslag, geen spleet tussen fundering en bodem. Uitvoer M-seep.*

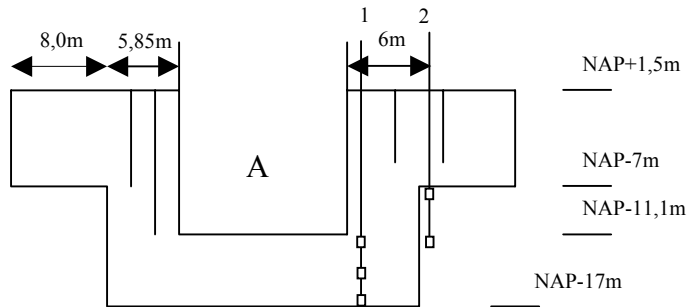
De invloed van de relatief korte kwelchermen is hier nauwelijks te zien.

Figuur 6.5 is feitelijk een weergave van kwelweg A uit bijlage 5. De afstand is 56,7 meter, hetgeen niet maatgevend is. De kwel volgens figuur 6.6 is niet berekend, omdat bij een kunstwerk op palen uitgegaan wordt van een spleet tussen constructie en ondergrond en de horizontale afstand dus niet mag worden meegerekend.

Om een indruk te krijgen van het verhang over het bovenhoofd worden de buizen 3 en 4 geplaatst achter scherm B (zie figuur 6.8). In combinatie met een meting van de buitenwaterstand kan hiermee het verhang over het bovenhoofd worden bepaald. Gekozen is voor buizen aan weerszijden van de sluis om een controle te hebben op de symmetrisch veronderstelde stroming rond de sluis.

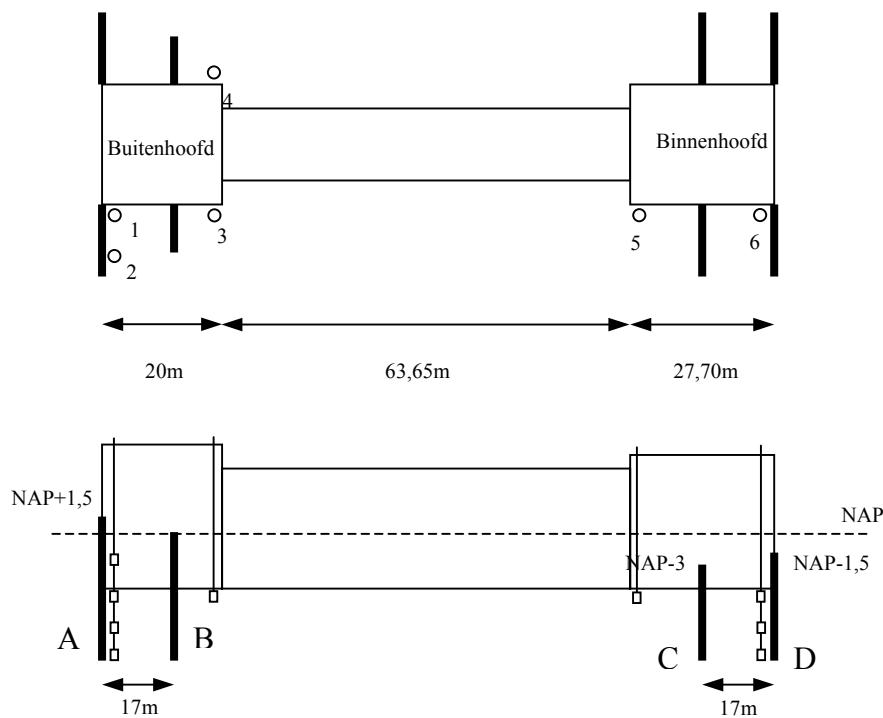
Door een vergelijking van de peilbuizen 1 en 2 (beide achter scherm A) kan mogelijk uitspraak worden gedaan over stroming onder het korte deel van scherm A (tot NAP-7m) door en langs het diepe deel (tot NAP-17m) heen. Dit stromingspatroon is onderdeel van kwelweg D uit bijlage 5. Buis 1 krijgt een filter op 3 niveaus, namelijk NAP-12m, NAP-15m en NAP-17m. De filters van buis 2 komen op NAP-8m en NAP-12m. De filters van de buizen 1 en 2 op NAP-12m worden gebruikt om een

uitspraak te kunnen doen over de stroming van buis 2 naar buis 1. Het filter van buis 2 op diepte NAP-8m komt ter plaatse van de trap in scherm A (zie figuur 6.7). Een vergelijking tussen de filters van buis 1 op NAP-17m en NAP-12m is een indicatie voor de verticale stroming langs het scherm. Het filter op NAP-15m dient hierbij als controle.



*Figuur 6.7: plaatsing van de filters in buizen 1 en 2 bij scherm A*

Om het uitreeverhang achter scherm D te kunnen bepalen wordt peilbuis 6 geplaatst met een filter op NAP-17m. Dit is ter plaatse van de onderzijde van het scherm. Samen met een meting van het polderpeil kan uitspraak worden gedaan over het verticale verhang langs scherm D. Dit is interessant voor de controle op heave. Omdat stroming van grondwater overwegend plaats zal vinden direct onder de vloer van de sluis worden hier, evenals bij het bovenhoofd, filters geplaatst op het niveau van de sluisbodem (NAP-12m). Buis 6 krijgt, om uitspraak te kunnen doen over verticale stroming langs het scherm, tevens een filter op NAP-15m. Buis 6 is daarmee qua uitrusting identiek aan buis 1.



*Figuur 6.8: schets plaatsing peilbuizen.*

In bijlage 7 is een situatietekening (schaal 1:500) gegeven met daarop de plaats waar de meetpunten gemaakt moeten worden. Tevens is een overzichtje gegeven met de te gebruiken peilbuizen en de diepte van de filters.

Zowel bovenstrooms als benedenstrooms dient tegelijk met het uitlezen van de peilbuizen de waterstand te worden geregistreerd. Hiertoe zal een stijgbuis aangebracht moeten worden op een zodanige plaats dat deze eenvoudig uitgelezen kan worden. De beide meetpunten in bijlage 7 zijn dan ook indicatief.

Omdat door de spleet onder de constructie de stroming voornamelijk onder en dicht naast de constructie plaats vindt moet ook dichtbij de constructie gemeten worden. Alle peilbuizen met uitzondering van buis 2 moeten derhalve zo dicht mogelijk naast de constructie worden aangebracht.

Tot slot van deze paragraaf volgt een samenvatting van bovenstaande gedachtegang in tabel 6.1. Aangegeven is wat gemeten kan worden door vergelijking van welke buizen.

Vergelijking tussen buizen/waterstand (filterdiepte)		Doel
1 (NAP-12m)	2 (NAP-12m)	Beoordeling achterloopsheid, filters van beide buizen bevinden zich op gelijke diepte zodat stroming van 2 naar 1 op het niveau van de sluisbodem beoordeeld kan worden.
1 (NAP-12m)	buitenwaterstand	Sprong in verhanglijn over scherm A
1 (NAP-17m)	1 (NAP-12m)	Verticale stroming langs A, met filter op NAP-15m als controle.
1 (NAP-12m)	3	Indicatie van sprong in verhanglijn over scherm B
buitenwaterstand	3	Verval over buitenhoofd, westzijde
buitenwaterstand	4	Verval over buitenhoofd, oostzijde
3	4	Controle op symmetrie in stromingspatroon/bodemopbouw.
3	5	Verhang over sluisbolk, controle op aanwezigheid van een spleet onder de kolkvloer.
5	polderpeil	Verval over binnenhoofd
5	6 (NAP-12m)	Indicatie van sprong in verhanglijn over scherm D
6 (NAP-17m)	polderpeil	Verticaal uittreeverhang over scherm D, controle op mechanisme heave
6 (NAP-12m)	6 (NAP-17m)	Verticale stroming langs D, met filter op NAP-15m als controle
6 (NAP-12)	polderpeil	Sprong in verhanglijn over scherm D

Tabel 6.1: mogelijkheden tot vergelijking tussen verschillende peilbuizen

## 6.5 Kosten van het meetprogramma

De geschatte kosten van het meetprogramma zijn samengevat in tabel 6.2. De kosten per onderdeel zijn een inschatting op basis van gegevens afkomstig van Fugro.

Onderdeel	Aantal	Kosten per eenheid (euro)	Kosten (euro)
Plaatsing peilbuizen met enkel filter	3	1000	3000
Plaatsing peilbuis, dubbel filter	1	2000	2000
Plaatsing peilbuis, driedubbel filter	2	2500	5000
Meetapparatuur, levering + installatie	6	1000	6000
Uitlezen buizen	5	400	2000
<i>Totaal</i>			<i>18000</i>

Tabel 6.2: geschatte kosten van het meetprogramma

## 6.6 Literatuur

- [1] Leidraad toetsen op veiligheid – TAW september 1999
- [2] Voorschrift Toetsen op Veiligheid – Ministerie van verkeer en Waterstaat, januari 2004
- [3] Technisch rapport Zandmeevoerende wellen, TAW maart 1999
- [4] Toetsrapport bijzondere locatie De Blocq van Kuffeler, Royal Haskoning oktober 2002
- [5] Grondonderzoek toetsing IJsselmeerdijken, Blocq van Kuffeler, Fugro voorjaar 2002
- [6] Hydraulische randvoorwaarden 2001
- [7] Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken

## H7 Hypothesen en opzet van verwerking peilbuismeting

### 7.1 Inleiding

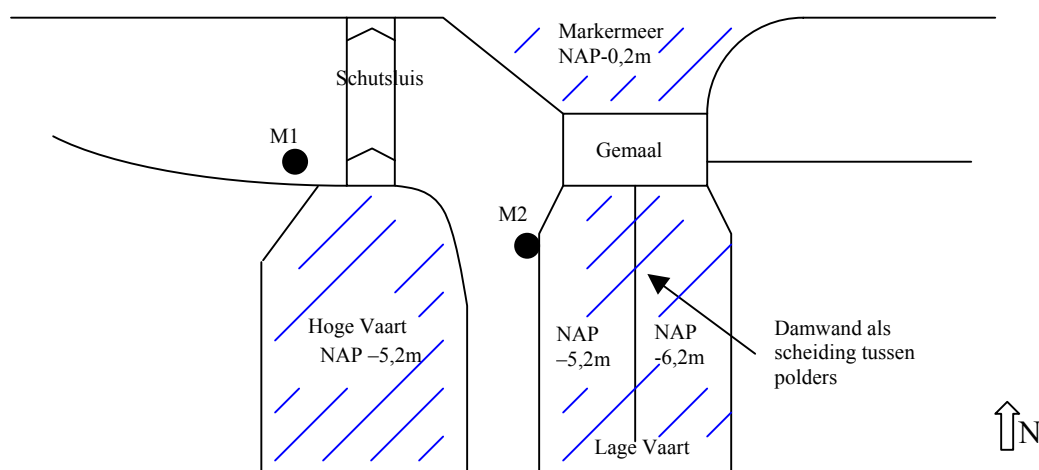
In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de wijze van verwerken van de grote hoeveelheid data afkomstig van de peilbuismetingen. In het meetplan (hoofdstuk 6) werd nog uitgegaan van handmatig eenmaal aflezen op drie verschillende dagen. In overleg met De Ruiter boringen is afgesproken met veel grotere regelmaat te meten. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van divers. Er is voor gekozen in eerste instantie drie weken lang continu om het kwartier een registratie te laten doen. Dit levert aanzienlijk meer data op dan oorspronkelijk de bedoeling was. Om optimaal gebruik te kunnen maken van de gegevens moet vooraf worden nagedacht over de verwerking. Dit hoofdstuk geeft een beschrijving hiervan.

Alvorens met de verwerking en analyse van de data te starten is het belangrijk dat reeds een globaal beeld bestaat van de stromingssituatie rondom de sluis. Aan de hand hiervan kunnen de verwachtingen over de uitkomsten worden geformuleerd. In hoofdstuk 8 worden middels een vergelijking tussen de hypothese en de uitkomsten afwijkingen ontdekt, waar vervolgens een verklaring voor wordt gezocht.

### 7.2 Hypothesen

#### 7.2.1 Grondwaterstroming

Een belangrijk gegeven bij de beoordeling van grondwaterstroming rond een object is de richting van de natuurlijke grondwaterstroming in het gebied. Tussen een rivier en een lager gelegen polder zal bijvoorbeeld altijd een gradiënt in de richting van de polder aanwezig zijn. Ook bij de Zuiderluis is sprake van stroming door een dijk in de richting van de polder. Bovendien lijkt bij de Zuiderluis nog een richting belangrijk te zijn. Omdat ter plaatse van het gemaal de Blocq van Kuffeler een overgang is naar een nog diepere polder, zie figuur 7.1, zal ook stroming ongeveer dwars op de sluis-as plaatsvinden, in de richting van het gemaal.



Figuur 7.1: overzicht van sluis, gemaal en polders met de peilbuizen M1 en M2.

Als bevestiging van de hypothese dient het rapport 'Toetsing bijzondere locatie de Blocq van Kuffeler' uit 2002 [1]. Uit het grondmechanisch onderzoek dat toentertijd

is verricht [2] blijkt dat reeds in 2002 een tweetal peilbuizen is geplaatst. In figuur 7.1 is de plaats van de buizen weergegeven als M1 en M2. Uit de gegevens blijkt dat het filter van M1 is afgesteld op NAP-12m en het filter van M2 op NAP-18m. De gemiddelde stijghoogte gemeten in M1 is NAP-4,22m en in M2 NAP-4,65m. Uitgaande van het feit dat de diepte van het filter hier niet veel invloed zal hebben, betekent dit dat de tendens van de globale stroming inderdaad in de richting van de diepe polder is.

Uitgaande van stroming in een rechte lijn van Markermeer naar M1 wordt een specifiek debiet gevonden van:

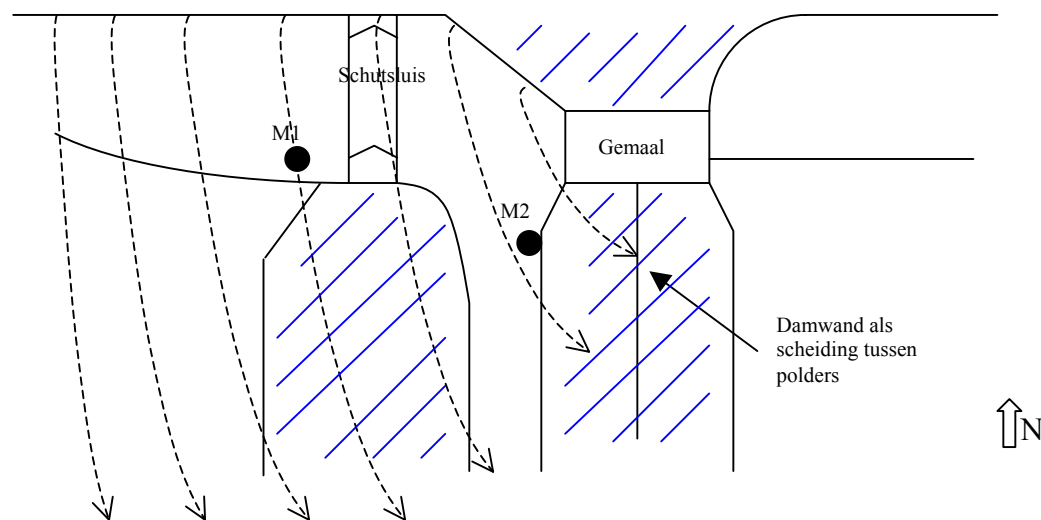
$$q_x = -k \cdot \frac{dh}{dx} = -k \cdot \frac{-0,2m - -4,22m}{100m} = -0,040k .$$

Uitgaande van stroming in een rechte lijn tussen M1 en M2 volgt een specifiek debiet van:

$$q_x = -k \cdot \frac{dh}{dx} = -k \cdot \frac{-4,22m - -4,65m}{125m} = -0,0034k .$$

Uitgaande van een homogeen en isotroop bodemmateriaal is de stroming richting diepe polder een factor 10 kleiner dan de kwelstroom vanuit het Markermeer.

Op basis van bovenstaande wordt verwacht dat op een zelfde afstand uit het Markermeer de stijghoogte westelijk van de sluis fractioneel hoger zal zijn dan oostelijk. Het bijbehorende verwachte stromingsbeeld is gegeven in figuur 7.2.



*Figuur 7.2: verwachte richting van grondwaterstroming in gebied rond Zuider sluis*

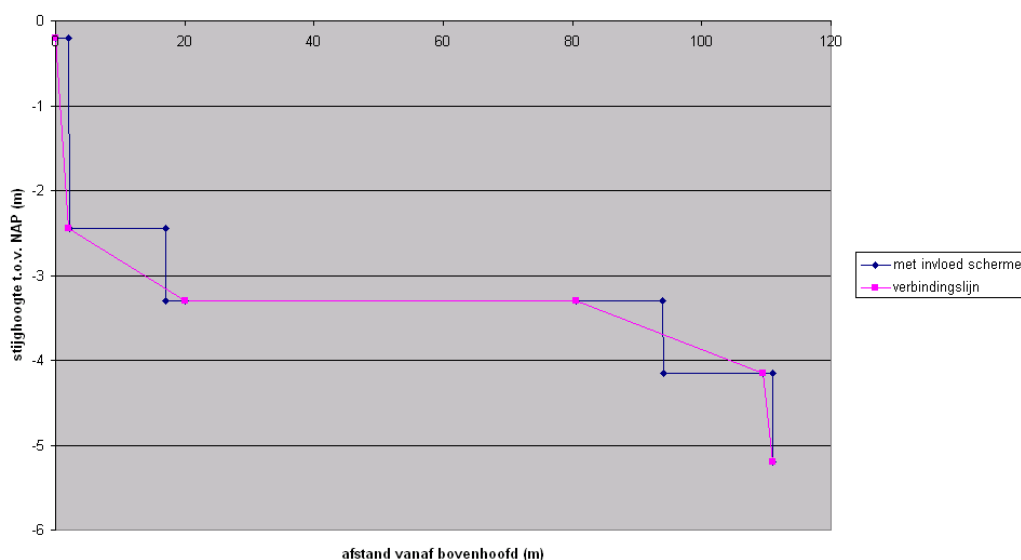
### 7.2.2 Theoretisch stijghoogteverloop

Als wordt uitgegaan van de methode van Lane en een  $C_w$ -waarde wordt gekozen die voor de gehele lengte van de sluis geldt, kan voor elk deel van de theoretische kwelweg het verhang worden bepaald (zie bijlage 8). Er wordt gerekend met een lineaire afname van het verval over de lengte van de kwelweg. Hierbij wordt



uitgegaan van een spleet onder de kolkvloer, zodat het verhang over deze afstand nagenoeg nul is. Stroming langs de hoofden gaat in deze beschouwing ook via een spleet. Ter plaatse van de schermen is een sprong in de verhanglijn te zien, tussen de schermen is het verhang nul aangenomen (zie figuur 7.3).

In de vorige paragraaf over de richting van de grondwaterstroming is reeds gebruik gemaakt van de gegevens van twee peilbuizen geplaatst en uitgelezen in 2002. Met name M1 is goed te gebruiken als controle op de uitkomsten van dit onderzoek. Zowel M1 als het nieuwe meetpunt B6 heeft namelijk een filter op niveau NAP-12m. De uitkomsten van de twee buizen zijn dus rechtstreeks te vergelijken. Op basis van een zuiver theoretische beschouwing volgens Lane komt de stijghoogte (met bovenstaande aannamen) in buis B6 op NAP-4,15m, hetgeen redelijk overeenkomt met NAP-4,22m gemeten in M1. De metingen in M1 zijn verricht in de zomer van 2002 zodat geen rekening hoeft te worden gehouden met een verschillend peil op het Markermeer. Ook de nieuwe metingen vinden plaats in de zomer met een bijbehorend peil van NAP-0,2m.



Figuur 7.3: theoretische verhanglijn op basis van de methode van Lane

### 7.2.3 Tijdsafhankelijkheid

In bijlage 9 is aan de hand van de theorie uit het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken [4] een modellering gemaakt van de tijdsafhankelijkheid bij onder- en achterloopsheid van waterkerende kunstwerken. Voor een beschrijving van het gekozen model en de gebruikte parameters wordt verwezen naar de bijlage. In deze paragraaf worden enkele resultaten toegepast op het onderzoek bij de Zuidersluis.

- Bij de Zuidersluis is geen sprake van getijdenbeweging. De enige fluctuatie in waterstand is afkomstig van eventuele opwaaiing op het Markermeer. Fluctuatie in de waterstand van de Hoge Vaart is mogelijk als gevolg van het lozen van schutwater (zeer kortdurende en locale verhoging met enkele tientallen centimeters) en fluctuaties in polderpeil bijv. als gevolg van verdamping en neerslag. De invloed van deze veranderingen is waarschijnlijk zeer beperkt.
- Als uitgegaan wordt van een verhoging van de waterstand op het Markermeer van 1m die 12 uur aanhoudt, blijkt de respons op deze verhoging over de lengte van de

sluis volledig te verdwijnen. Dit betekent dat de bovenstroomse peilbuizen een verhoging zullen registreren, maar dat deze door demping benedenstrooms al bijna niet meer merkbaar is. Hieruit volgt dat tijdelijke variaties in verval weinig invloed hebben op de onder- en achterloopsheid.

- Als bovenstaande fluctuaties met een periode van enkele uren al weinig effect hebben op de stijghoogte benedenstrooms, zullen kortdurende veranderingen al helemaal niet leiden tot een significante verandering in stijghoogte ter plaatse van een uittreepunt.

## 7.3 Verwerking meetgegevens

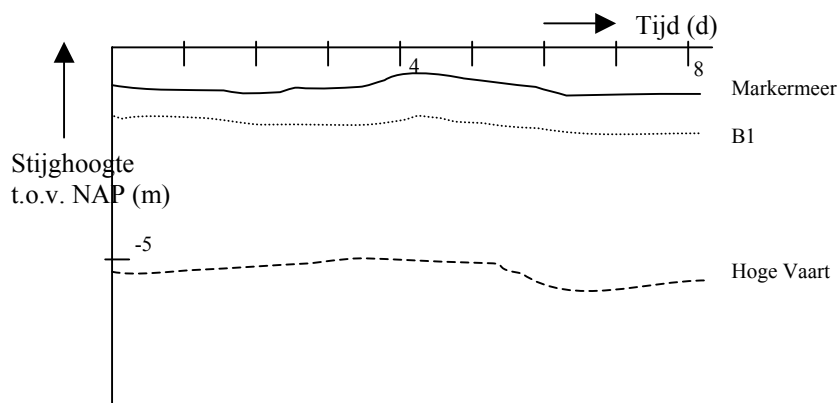
### 7.3.1 Inleiding

In hoofdstuk 6 is uitgegaan van 6 peilbuizen, waarin drie weken lang één keer per week de stijghoogte zou worden opgenomen, telkens voor de eerste schutting. Zoals in de inleiding reeds werd vermeld wijkt de uiteindelijke meting af van het plan slechts een paar maal de stijghoogte te meten. Op advies van De Ruiters boringen is gekozen voor continu elektronisch registreren met een interval van 15 minuten over een periode van 3 weken. De verwerking wordt door de grotere hoeveelheid gegevens iets uitgebreider. Wellicht dat echter ook meer en/of meer gedetailleerde informatie te verkrijgen is.

In deze paragraaf wordt ingegaan op enkele verwerkingsmethoden

### 7.3.2 Diagram van de stijghoogte per buis

Voor elke peilbuis kan met het spreadsheetprogramma MS Excel een diagram worden gemaakt als in figuur 7.4. In het diagram wordt het verloop van de grondwaterstand uitgezet tegen de tijd. Samen met de gegevens over de binnen- en buitenwaterstand (die 6 maal per dag worden geregistreerd door de sluiswachters) kan een indruk worden verkregen van de stijghoogte op de gemeten plaats ten opzichte van de binnen- en buitenwaterstand.



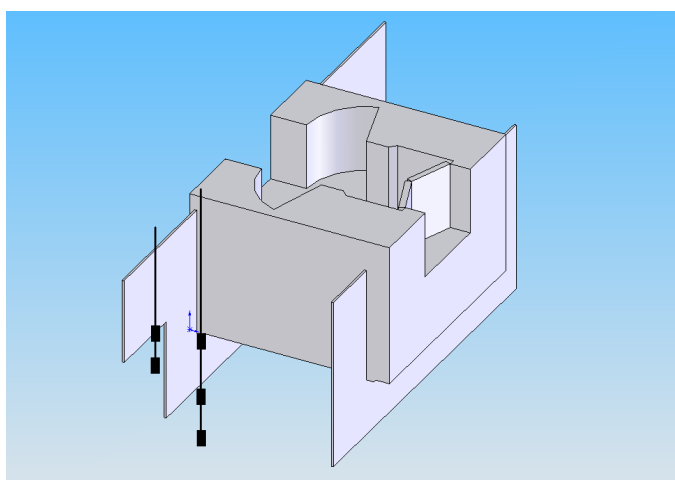
Figuur 7.4: schets van diagram met waterstanden uitgezet tegen de tijd.

Op bovenstaande wijze kan voor elke peilbuis een diagram worden gemaakt. Zonder onderlinge vergelijkingen te maken tussen de buizen kan reeds beoordeeld worden of de betreffende stijghoogte op een plaats meer neigt naar de buiten- of de binnenwaterstand. Hiermee kan al een eerste indruk van de ligging van de verhanglijn

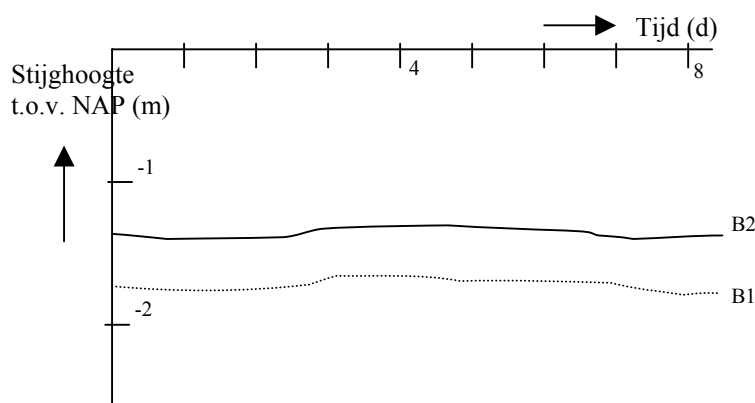
worden verkregen. Vervolgens kan de gemiddelde stijghoogte worden berekend over de gehele meetperiode. Als dit voor elke peilbuis gedaan wordt kan met deze gegevens en de bekende afstand tussen de buizen een verhanglijn worden geconstrueerd zoals in figuur 7.3 is getoond. Deze verhanglijn afkomstig uit metingen wordt vervolgens vergeleken met de theoretische verhanglijn volgens de methode van Lane.

### 7.3.3 Vergelijking van stijghoogte tussen de buizen onderling

Nu een grafiek is gemaakt van het verhang over de sluis is de volgende stap een onderlinge vergelijking van de verschillende buizen. Zo is het voor de stroming om het scherm (achterloopsheid) interessant de stijghoogten van de buizen B1 en B2 te vergelijken (zie bijlage 10). Als de beide buizen met filter op NAP-12m worden vergeleken kan uitspraak worden gedaan over een eventuele stroming langs het scherm. In figuur 7.5 is een 3D weergave getekend van de situatie achter scherm A.



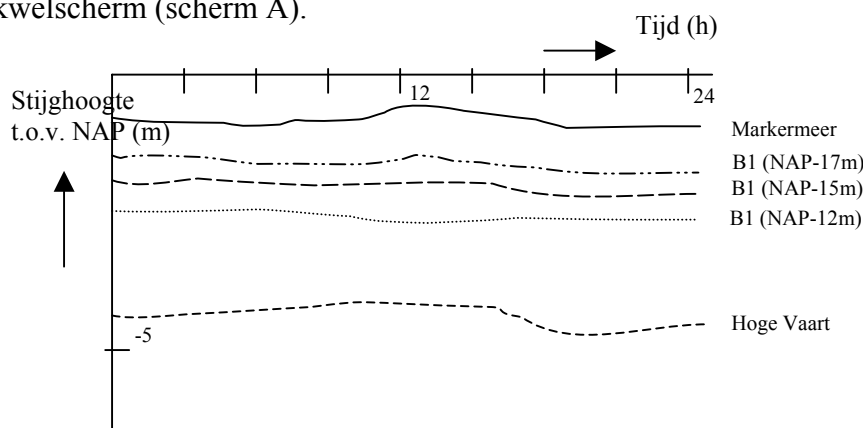
*Figuur 7.5: stroming rond getrappt kwelscherm, plaatsing peilbuizen voor een zo goed mogelijke registratie van de stroming achter het scherm.*



*Figuur 7.6: vergelijking tussen B1 en B2 t.b.v. het aantonen van stroming langs het bovenstroomse kwelscherm.*

Om de stroming onder het scherm door te beoordelen zijn zowel bij B1 als bij B2 filters op meerdere diepten geplaatst. Met een diagram waarin de stijghoogten van deze filters worden vergeleken kan mogelijk uitspraak worden gedaan over stroming

in verticale richting ter plaatse van B1 en B2. Samen met figuur 7.6 moet duidelijk worden hoe de oriëntatie is van de grondwaterstroming achter het bovenstroomse kwelscherm (scherm A).



*Figuur 7.7: vergelijking tussen de verschillende filterniveaus van B1*

Een dergelijke bewerking kan ook worden verricht bij B6, de benedenstroomse peilbuis met drie filterniveaus. Ook hier kan met behulp van een diagram als in figuur 7.7 uitspraak worden gedaan over stroming in verticale richting. Op ca. 20 meter westelijk van peilbuis B6 is de bestaande peilbuis M1 met een filterniveau op NAP-12m. Hiervan zijn enkele stijghoogten [2] bekend. Aan de hand van deze oude waarden kan een simpele controle worden uitgevoerd op de uitkomsten van B6.

Een vergelijking tussen B3 en B5 tenslotte geeft informatie over het al dan niet aanwezig zijn van een spleet onder de sluis. Een vergelijking tussen B5 en B6 geeft het verval over het binnenhoofd. Vanwege de aanwezigheid van twee kwelschermen volgt hieruit niet direct het werkelijk aanwezige verhang. Dit zal veel meer sprongsgewijs verlopen. Een zelfde redenering geldt voor B1 en B3, waaruit het verval over het buitenhoofd is te berekenen.

### 7.3.4 Symmetrie en richting

Uit een vergelijking tussen B3 en B4 kan een oordeel worden gegeven over de symmetrie van de stroming onder en langs de sluis. Wellicht dat door een andere bodemsamenstelling de stroming westelijk van de sluis afwijkt van de stroming oostelijk. Een eventueel verschil tussen de stijghoogten zou ook kunnen duiden op stroming in een richting min of meer loodrecht op de sluisas, zoals wordt beschreven in paragraaf 7.2.1. Bij de beoordeling van stroming in een richting min of meer loodrecht op de sluisas kan ook de oude peilbuis M1 worden betrokken.

### 7.4 Schutproces

Omdat het schutten mogelijk invloed heeft op het verloop van de stijghoogte moet globaal bekend zijn hoe de schutcyclus verloopt. Zowel vullen als ledigen duurt ongeveer 8 minuten. Hierbij wordt ca. 3800m<sup>3</sup> water verplaatst. Het aantal schuttingen is sterk afhankelijk van de recreatievaart. In drukke weekeinden zijn er soms wel 20 schutcycli per dag. Op werkdagen ligt dit aantal rond de 4 tot 6. Bij beroepsvaart verloopt het proces sneller dan bij recreatievaart. Bij de laatste wordt het legen van de sluis een beetje ‘geknepen’ om recreanten de tijd te geven de lijnen over te leggen van een hogere naar een lagere haalkom.

## 7.5 Voorbereiding

Op 22 april is, op basis van de gegevens uit hoofdstuk 6 een offerteaanvraag gedaan bij twee bedrijven. Twee weken later volgde de gunning. De weken die daarop volgden zijn gebruikt voor het afhandelen van enkele onduidelijkheden met betrekking tot de plaats van de buizen, eventueel moeilijk bereikbare plaatsen en te verwijderen bestrating. In week 22, begin juni, is een KLIC melding gemaakt voor het bepalen van de plaats van kabels en leidingen. Uiteindelijk zijn de peilbuizen in week 23 geplaatst. De divers zijn in week 24 aangebracht.

### 7.5.1 Beschrijving van de pulsboortechniek

Voor het aanbrengen van de peilbuizen is gebruikt gemaakt van de methode pulsbooren, die hier kort beschreven wordt. Op de plaats waar de buizen geplaatst moeten worden, wordt het materieel geïnstalleerd (zie figuur 7.8). Een boorwagen met uitklapbare giek en draaitafel. Eerst wordt met een Edelmanboor ca. 1,5m voorgeboord. Kabels en leidingen die mogelijk aanwezig zijn kunnen zo worden opgespoord. De eerste casing (=metalen mantelbuis) die met behulp van een lier op de boorwagen in het gat wordt geplaatst heeft een (met een opgelegde las) verbrede kop. Deze zorgt voor een gat dat net iets breder is dan de casings die gaan volgen. De weerstand tijdens aanbrengen is hierdoor minder groot en plaatsen van de casings kost minder moeite.



*Figuur 7.8: uitvoering pulsboringen. Vanaf linksboven met de klok mee: materieel, plaatsen eerste casing in B1, peilbuizen, in elkaar draaien van de casings.*

Als de eerste casing in het voorgeboorde gat is geplaatst, wordt de puls aan de lier gekoppeld en in de casing neergelaten. Door mechanisch de puls te trekken en weer te laten vallen wordt telkens een beetje grond binnen de casing weggehaald. De grond

komt los door verweking. De gehele casing blijft telkens tot de rand gevuld met water, zodat in de bodem een toestand van lage korrelspanning wordt verkregen en materiaal als suspensie in de puls komt. Een terugslagklep in de puls voorkomt dat de korrels terugstromen in het gat. Op deze manier wordt de gehele puls gevuld met grond, waarbij een geroerd grondmonster wordt verkregen. Telkens als de puls vol is wordt deze uit de casing gehesen en naast het boorgat geleegd, waarna het hele proces wordt herhaald. Doordat aan de onderzijde van de casing materiaal wordt weggehaald zakt de casing zelfstandig, of soms met een beetje draaien en duwen, een stukje verder het gat in.

Als een twee meter lange casing tot een bepaald niveau is gedaald, wordt er een nieuwe opgeschroefd. Dit schroeven gebeurt door inklemmen in de draaitafel en vasthouden van de reeds geplaatste casing.

Als het gat op diepte is worden één voor één de PVC-peilbuizen met onderaan een filter in het gat geplaatst. Een filter wordt omstort met filtergrind, tussen de filters wordt een afdichting van kleikorrels aangebracht. Het resterende gat wordt tot maaiveld gevuld met zand. Als de buizen zijn aangebracht wordt al draaiende de totale casing getrokken. Elke aparte casing wordt afgeschroefd en weer opgeslagen voor hergebruik.

### 7.5.2 Uitvoering van de boringen

De peilbuizen zijn aangebracht in de week van 6 t/m 11 juli. Een verslag van de uitvoering is opgenomen in bijlage 11.

Alleen B2 en B6 zijn niet op de gewenste plaats aangebracht. Op de aangegeven plaats van B2 zat een ankerstang in de weg, bij B6 was niet voldoende ruimte om het materieel veilig te plaatsen en te bedienen. De buizen in B2 zijn ca. 1m verder uit het buitenhoofd geplaatst. Het boorgat B6 moest ruim 4 meter worden verplaatst, en kwam daarmee op ca. 5 meter uit het binnenhoofd. De voorgeschreven filterdiepte is op alle meetpunten bereikt. Bijlage 10 (=revisie van bijlage 7) geeft een overzicht van de plaatsen waar de buizen werkelijk zijn aangebracht.



*Figuur 7.9: de uitvoering van boring B6. Het schoonzuigen van het filter.*

### 7.5.3 Verwijderen van de buizen

De peilbuizen zijn in week 32 verwijderd. Verwijderen betekent in dit geval echter niet letterlijk uit de bodem halen, zoals zou worden verwacht. In plaats van het trekken van de buizen, worden ze volgestort met kleikorrels. Door het contact met grondwater zwellen de korrels op en dichten zo de buis af. De peilbuizen worden vervolgens ca. 20cm onder maaiveld afgezaagd. De straatpotten die de bovenkanten van de buizen afdekten worden verwijderd en het gat wordt aangeaard.

Het afdichten en in de grond achterlaten van de buizen is veiliger dan het daadwerkelijk trekken van de buizen. Er kan op deze manier geen kortgesloten kwelweg ontstaan. De perforatie van eventueel afdichtende lagen is afgesloten en kan geen kwelgevaar meer vormen.

### 7.6 Literatuur

- [1] Toetsrapport bijzondere locatie De Blocq van Kuffeler, Royal Haskoning oktober 2002
- [2] Grondonderzoek toetsing IJsselmeerdijken, Blocq van Kuffeler, Fugro voorjaar 2002
- [3] Technisch rapport Zandmeevoerende wellen, TAW maart 1999
- [4] Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken, TAW 1 september 2004







# H8 Meetresultaten en uitwerking

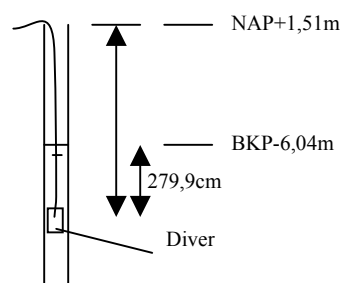
## 8.1 Inleiding

De eerste meetresultaten komen uit week 24. Aan het begin van deze week, op maandag 13 juni, zijn de divers in de peilbuizen afgesteld. De meetresultaten zijn aan het begin van week 25 in tabelvorm aangeleverd. Dit hoofdstuk geeft een analyse van deze resultaten. Op basis hiervan worden conclusies getrokken over de veiligheid van de Zuidersluis met betrekking tot het faalmechanisme piping. Tevens wordt getracht aan de hand van de stijghoogten een beeld te krijgen van de grondwaterstroming onder en langs het kunstwerk en hiermee de theorie te controleren.

## 8.2 Verwerking ruwe gegevens

Om de aangeleverde gegevens te kunnen interpreteren moeten een paar bewerkingen worden uitgevoerd. De eerste waarden (tot en met 13 in figuur 8.1) zijn registraties voor aanvang van de meting en moeten worden verwijderd. De eigenlijke meting begint bij diver 1-diep pas bij nr. 14. De divers zijn op een vaste diepte ten opzichte van de bovenkant van de peilbuis afgesteld. Vervolgens wordt om het kwartier de hoogte van de waterkolom boven de diver gemeten. Uit de plaatsingsgegevens en de eerste meting (in dit geval nr. 14) is de plaats van de diver te berekenen. Met deze informatie is vervolgens elke waarde van kanaal 1 om te zetten naar een waterstand in de peilbuis ten opzichte van NAP. De waarde van kanaal 2 stelt de temperatuur van het grondwater voor, gemeten in graden Celsius.

Instrument type	: Diver (sn. 41471)	Uitleesdatum	: 20-jun	
Instrument nummer	: 5584075	Locatie	: 1 Diep	
Locatie	: 1.D	Hoogte BKP t.o.v. NAP	: 1,51	
Sample methode	: Vast	GWS (m-A- BKP)	: 6,01	
Sample snelheid	: 15 Minuten	Tijdstip	: 14:37	
Kanaal 1	: LEVEL			
Referentie	: 0.0 CM WC			
Bereik	: 1000.0 CM WC			
Master level	: 0.0 CM WC			
Kanaal 2	: TEMPERATURE			
Referentie	: -20.00 DEGREE			
Bereik	: 100.00 DEGREE			
No.	Datum	Tijd	Kanaal 1	Kanaal 2
1	13-6-2005	8:26:36	74,0	21,2
2	13-6-2005	8:41:36	73,9	24,9
3	13-6-2005	8:56:36	74,0	24,4
4	13-6-2005	9:11:36	73,9	24,1
5	13-6-2005	9:26:36	74,1	23,9
6	13-6-2005	9:41:36	75,6	23,5
7	13-6-2005	9:56:36	76,0	21,3
8	13-6-2005	10:11:36	76,4	19,4
9	13-6-2005	10:26:36	76,3	17,6
10	13-6-2005	10:41:36	75,3	17,1
11	13-6-2005	10:56:36	75,1	17,2
12	13-6-2005	11:11:36	75,9	17,3
13	13-6-2005	11:26:36	75,7	16,4
14	13-6-2005	11:41:36	279,9	14,0
15	13-6-2005	11:56:36	270,8	13,6
16	13-6-2005	12:11:36	265,9	13,5
17	13-6-2005	12:26:36	270,7	13,5



Peil Diver:  $(1,51 - 6,04) - 2,799m =$   
 $NAP-7,329m$   
 Voor elke waarde van kanaal 1 geldt:  
 $GWS \text{ t.o.v. NAP} = -7,329m +$   
 waarde kanaal 1

Figuur 8.1: deel van de tabel met ruwe meetwaarden van diver 1-diep (filter op NAP-17m) en een schets met de bepaling van de positie van de diver t.o.v. NAP.

Na het verwijderen van de eerste waarden en het berekenen van de grondwaterstand ten opzichte van NAP ziet de tabel er uit zoals in figuur 8.2. Opgemerkt wordt dat de figuur slechts een klein deel laat zien van een tabel bestaande uit 700 meetwaarden. Voor de volledigheid is tevens de absolute waterdruk berekend bij elke waarde van de waterstand in de peilbuis. Voor de verdere verwerking en onderlinge vergelijking is



de stijghoogte echter de meest belangrijke parameter. De bewerkingen zijn uitgevoerd op de meetwaarden van alle 11 divers.

Instrument type	: Diver (sn. 41471 )	Uitleesdatum	: 20-jun
Instrument nummer	: 5684075	Locatie	: 1 Diep
Locatie	: 1.D	Hoogte BKP t.o.v. NAP:	: 1,51
Sample methode	: Vast	GWS (m-/ BKP):	: 6,01
Sample snelheid	: 15 Minuten	Tijdstip:	: 14:37
Kanaal 1	: LEVEL		
Referentie	: 0.0 CM WC		
Bereik	: 1000.0 CM WC		
Master level	: 0.0 CM WC		
Kanaal 2	: TEMPERATURE		
Referentie	: -20.00 DEGREE		
Bereik	: 100.00 DEGREE		

No.	Datum	Tijd	Kanaal 1 (cm wc)	Stijghoogte tov NAP (cm)	Absolute druk (kPa)	T (graden Celsius)
14	13-6-2005	11:41:36	279,9	-453,0	132,1	14,0
15	13-6-2005	11:56:36	270,8	-462,1	131,2	13,6
16	13-6-2005	12:11:36	265,9	-467,0	130,8	13,5
17	13-6-2005	12:26:36	270,7	-462,2	131,2	13,5
18	13-6-2005	12:41:36	271,5	-461,4	131,3	13,5

Figuur 8.2: deel van de tabel met meetwaarden van diver 1-diep na bewerking

### 8.3 Verhang

De paragrafen 8.3 en 8.4 geven blijk van een fasering. In 8.3 wordt getracht met enkel de informatie uit de verhanglijn op basis van de metingen een oordeel over de veiligheid met betrekking tot piping te geven. Omdat de verhanglijn veel informatie biedt kan dit oordeel snel gegeven worden. De conclusie van de eerste fase is gegeven in 8.3.3. Vervolgens wordt in 8.4 dieper ingegaan op de stroming rond de verschillende onderdelen van de sluis. De situatie rond buitenhoofd, kolk en binnenhoofd wordt apart besproken. Getracht wordt de werkelijke kwelweg in kaart te brengen.

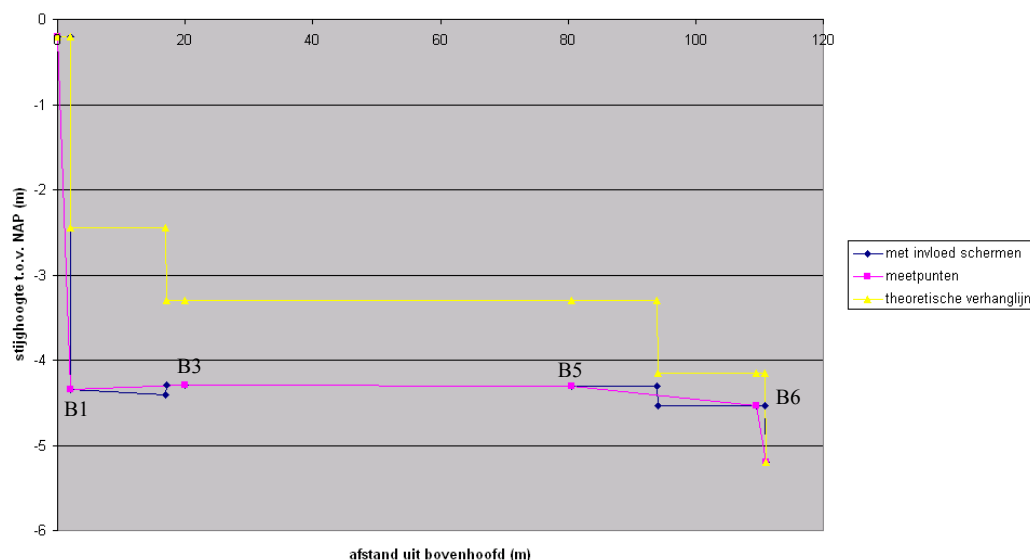
Het doel van de fasering is laten zien dat ook met een beknopte analyse een goed oordeel gegeven kan worden. Onderdelen die onduidelijk blijven kunnen al naar gelang de noodzaak nader worden geanalyseerd. Een aanpassing van het meetprogramma in die bepaalde richting is dan ook mogelijk.

#### 8.3.1 Verhanglijn

De volgende stap in de uitwerking is het omzetten van de tabellen naar grafieken. Zoals in hoofdstuk 7 is aangegeven kan voor elke peilbuis afzonderlijk de stijghoogte worden uitgezet tegen de tijd. Samen met de bekende buiten en binnenwaterstand kan een verhanglijn worden opgesteld. Er is hierbij gebruik gemaakt van diver 1-ondiep, diver 3, diver 5 en diver 6-ondiep. Dit betekent dat een verhanglijn is bepaald die de situatie direct naast de sluis weergeeft op een diepte van NAP-12m. Er is gebruik gemaakt van de gemiddelde stijghoogte over een week. Figuur 8.3 toont het resultaat.

Bij vergelijking met de theoretische lijn valt direct op dat de sprong over scherm A (zie bijlage 4) veel groter is dan werd verwacht. Er is sprake van een afname van de stijghoogte met ruim 4 meter tussen het buitenwater en meetpunt B1-ondiep. Tussen meetpunt 5 en 6 neemt het verval met ca. 0,3m af. Tussen meetpunt 6 en het binnenwater neemt het verval met ca. 0,7m af tot polderpeil (NAP-5,20m). De stijghoogte in B3 is gelijk aan die in B5, dus het verhang over de kolk is nul, zoals op basis van de fundering op palen ook werd verwacht.

Tussen B1 en B3 neemt de stijghoogte toe. Dit is zeker niet in lijn met de verwachtingen. Ook hier zou als gevolg van een spleet onder de constructie het verhang nagenoeg nul moeten zijn. Bij stroming in benedenstroomse richting moet de stijghoogte in B1 in ieder geval groter zijn dan in B2. Ook dat is niet het geval. Vermoed wordt dat sprake is van een meetfout.



Figuur 8.3: verhanglijn op basis van de meetresultaten

De grote sprong in de verhanglijn over scherm A (figuur 8.3) is te verklaren met de aanwezigheid van een afdichtende keileemlaag, waarvan in het toetsrapport 2002, bijzondere locatie de Blocq van Kuffeler [1], notie wordt gemaakt. Ook op tekening ZZWXT000146, overzicht grondwerken en boringen [2] is de laag teruggevonden. Deze afdichtende laag is tijdens de bouw aan de Markermeerzijde van scherm A aangebracht en afgedekt met wiepen, stort- en zetsteen (zie bijlagen 12 en 13). Blijkbaar is het totaal nog dermate intact dat in combinatie met het kwelscherm een afname in het verval van 4 meter wordt bereikt. Het is duidelijk dat de aanwezigheid en de goede werking van de keileemlaag bovenstrooms hiermee bevestigd zijn. Aan de polderzijde van het binnenhoofd is volgens dezelfde gegevens ook een keileemlaag aanwezig. Als deze net zo goed intact is, is de sprong over scherm D wellicht veel kleiner en daalt de grondwaterstand achter D niet direct tot NAP-5,20m. Omdat dit de situatie alleen veiliger maakt (afgezien van opbarsten) wordt hier verder niet vanuit gegaan.

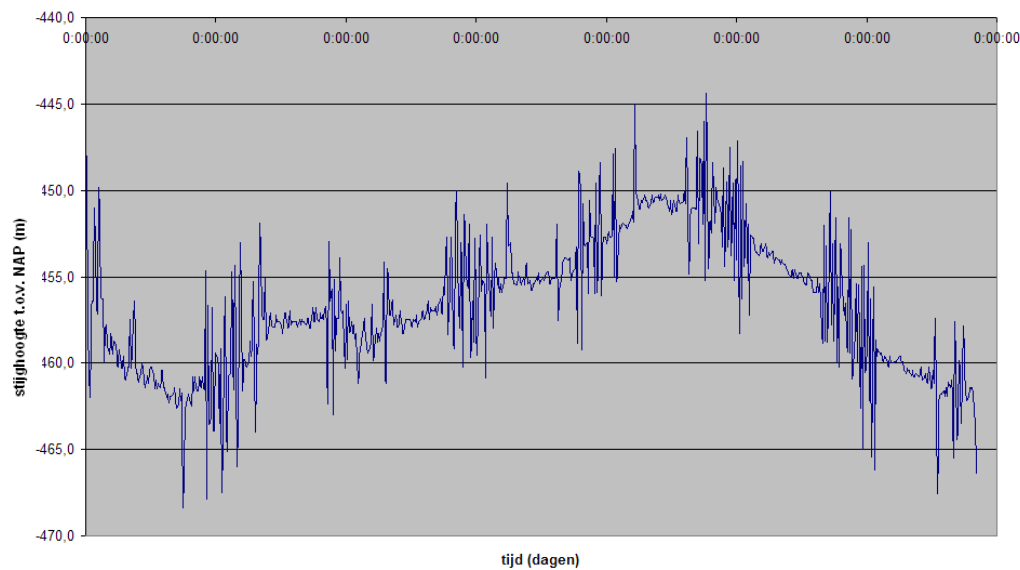
In paragraaf 8.5 wordt dieper ingegaan op de invloed van de keileemlagen.

In paragraaf 7.2.2 werd geconcludeerd dat de stijghoogte in B6 volgens een theoretische beschouwing met de methode van Lane redelijk overeenkwam met de stijghoogte zoals gemeten in M1. De aanwezigheid van keileemlagen was toen echter nog niet bekend. Als de invloed hiervan was meegenomen in de berekening van de verhanglijn had M1 waarschijnlijk niet meer gecorrespondeerd met B6. Geconcludeerd kan worden dat M1 buiten het invloedsgebied van de keileemlagen ligt en daarom redelijk overeenkomt met de theoretische situatie zonder keileem.

Het verhang onder het binnenhoofd komt redelijk overeen met de hypothese. De sprong over de schermen is iets kleiner dan verwacht. Ook het horizontale verloop van de verhanglijn ter hoogte van de sluiskolk komt volledig overeen met hetgeen, bij een op palen gefundeerde sluis, te verwachten is. De resultaten bevestigen de aanwezigheid van een spleet tussen kolkvloer en ondergrond.

### 8.3.2 Fluctuaties in de stijghoogte

Als niet enkel de gemiddelde waarde van de stijghoogten wordt beschouwd, maar ook het verloop van de stijghoogte in de tijd blijkt deze in eerste instantie allerm minst constant te zijn. Er is een fluctuatie in de orde 30cm, ofwel 3kPa. Ter illustratie dient de stijghoogte van buis B1-diep (figuur 8.4).



Figuur 8.4: verloop van de stijghoogte in B1-diep over de gehele meetperiode van een week (0:00 komt in de figuur overeen met 12 uur 's middags)

Alhoewel er op het eerste gezicht geen lijn in de gegevens lijkt te zitten zijn er wel degelijk conclusies aan te verbinden.

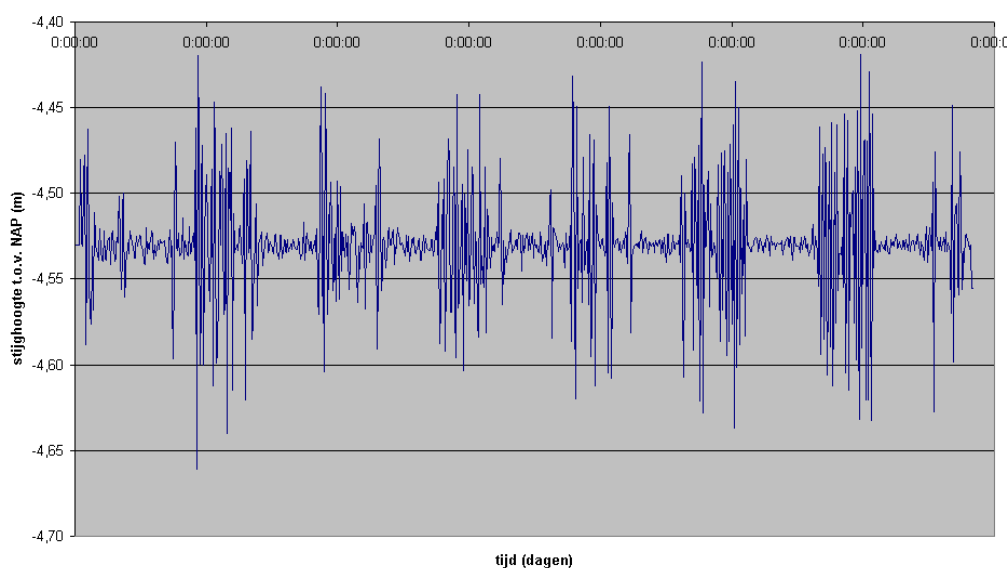
- Er is een duidelijk verschil in stijghoogteverloop tussen dag en nacht. Overdag (tussen ca. 8:00 en 22:00) is duidelijk een behoorlijke fluctuatie (5 tot 10 centimeter) te zien, terwijl 's nachts de stijghoogte veel meer constant is.
- Afgezien van de snelle en relatief grote fluctuaties overdag is het verloop van de stijghoogte over de periode van een week ook niet constant. Er is sprake van een langzame verandering van de stijghoogte in de tijd, gedurende de meetweek.

Het verschil tussen het verloop van de stijghoogte overdag en 's nachts heeft twee mogelijke oorzaken:

1. Er is lekkage, bijvoorbeeld in de dilatatievoegen van de kolk. Als gevolg van het lek stroomt bij elke schutting water in en uit de kolk.
2. Door het vullen van de kolk zakt deze iets, zelfs ondanks de fundering op palen, en gaan de wanden iets naar buiten staan. Deze bewegingen veroorzaken een instantane verhoging van de waterspanning. Tijdens het legen van de kolk is juist sprake van ontspanning.

Bij een lekkage zou de grondwaterstand gedurende de dag moeten stijgen, er stroomt immers steeds meer water uit de kolk in de bodem. Op basis van de meetresultaten is dat nog niet vast te stellen. Nader onderzoek is nodig. Tegen punt 1 spreekt in ieder geval het feit dat tijdens het groot onderhoud in de zomer van 2004, waarin de kolk geruime tijd heeft droog gestaan, er geen lekkage is vastgesteld.

Als lekkage niet het geval is blijft punt 2 over. Zoals vermeld zal zelfs een op palen gefundeerde sluis nog iets verticaal kunnen verplaatsen als gevolg van het belasten en ontlasten van de palen. Bij elke schutbeweging wordt in minder dan 10 minuten ca. 3800 m<sup>3</sup> water in de kolk gelaten. Ter plaatse van de bodem (NAP-11m) betekent dit een drukverhoging van 50kPa, ofwel 5 meter waterkolom. Ook het vervormen van de wanden kan bijdragen aan een fluctuatie in stijghoogte tijdens het schutten.



*Figuur 8.5: het verloop van de stijghoogte in B1-diep, gecorrigeerd voor de luchtdruk*

De snelle drukopbouw is waarschijnlijk mogelijk door de aanwezigheid van veel fijne en matig fijne zandlagen die relatief slecht doorlatend zijn. De verhouding tussen de stijfheid van het water (luchtbellen in poriën) en de grond is hierbij maatgevend. Bepalend daarbij zijn de verzadigingsgraad, pakkingsdichtheid en anisotropie [3]

De veel langzamere fluctuatie in de stijghoogte gedurende de gemeten periode is het gevolg van veranderingen in de luchtdruk gedurende de meting. De luchtdruk is echter gedurende de meetperiode ook om het kwartier geregistreerd en wordt gebruikt om de gemeten stijghoogten te corrigeren. Figuur 8.4, gecorrigeerd voor de buitenluchtdruk, is weergegeven in figuur 8.5. De stijghoogte blijkt, afgezien van de snelle fluctuaties overdag, constant te zijn in de tijd. Deze conclusie geldt voor alle 11 meetpunten.

### **8.3.3 Conclusie op basis van verhanglijn**

Op basis van de verhanglijn is er veel veiligheid op het gebied van onder- en achterloopsheid. Het meest bovenstroomse scherm vormt samen met de keileemlaag een zeer goede afdichting. Direct achter het kwelscherm is de grondwaterstand nog maar een meter hoger dan het polderpeil. Het verhang over de sluis (met een lengte

van 110m) is dus minimaal. De metingen bevestigen de aanwezigheid van een spleet onder de gehele sluis. Over de schermen C en D is het potentiaalverschil 0,25m respectievelijk 0,75m.

Eén van de vragen in het onderzoek naar de beoordeling van onder- en achterloopsheid is of aanwezige kwelschermen aangetoond kunnen worden met de resultaten van een peilbuisonderzoek. Het antwoord op deze vraag is in dit geval bevestigend. Met de verhanglijn in figuur 8.3 kan worden aangetoond dat reeds over de eerste paar meters van het buitenhoofd een grote sprong in het verval aanwezig is. Zonder kennis over de kwelmaatregelen is hiermee aangetoond dat er een adequaat werkende voorziening aanwezig is.

Onder het binnenhoofd, tussen B5 en B6, neemt de stijghoogte met ca. 0,25 meter af. Over de korte afstand tussen B6 en de Hoge Vaart is een daling van 0,75 meter te zien. Als wordt uitgegaan van een spleet onder de constructie moet de daling tussen B5 en B6 veroorzaakt worden door een scherm dat ergens tussen deze twee meetpunten staat. De daling in potentiaal na meetpunt B6 kan alleen worden veroorzaakt door scherm D. De werking van dit scherm is hiermee bevestigd.

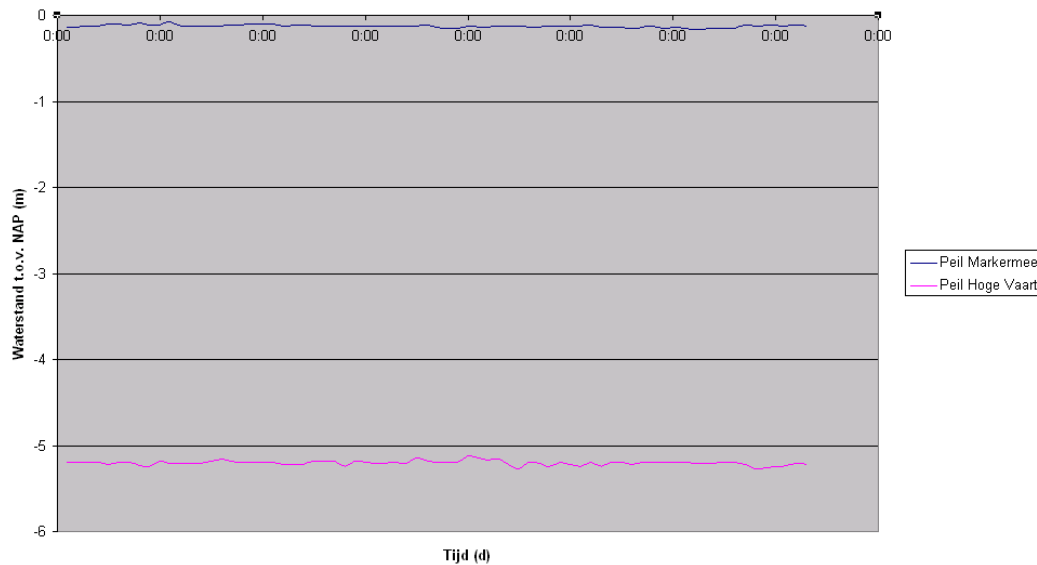
## **8.4 Stijghoogteverloop in detail**

### **8.4.1 Waterstanden**

In de vorige paragraaf is de analyse enkel gebaseerd op de verhanglijn. Het betreft de verhanglijn van de meetpunten het dichtst bij de sluis, met het filter op niveau NAP-12m. Omdat meer informatie beschikbaar is (filters op andere diepten dan NAP-12m en op grotere afstand uit de kolk) kan de analyse worden gedetailleerd. Getracht wordt meer duidelijkheid te krijgen over de richting van de grondwaterstroming rond het kunstwerk, ofwel de werkelijke kwelweg die het grondwater volgt.

Belangrijk bij de bestudering van de stijghoogte in de verschillende buizen is het verloop van de buiten en binnenwaterstand. Bij de verhanglijn (figuur 8.3) is uitgegaan van NAP-0,2m voor het Markermeer en een peil van NAP-5,20m in de Hoge Vaart. De werkelijke waarden blijken erg weinig van dit gemiddelde af te wijken. In figuur 8.6 is het verloop van de waterstanden op zowel Markermeer als Hoge Vaart weergegeven tegen de tijd. Fluctuaties zijn kortdurend. De maximale en minimale waarde in de meetreeks verschillen slechts 10 cm. De invloed van de variaties in de waterstanden op de stijghoogten is derhalve verwaarloosbaar klein.

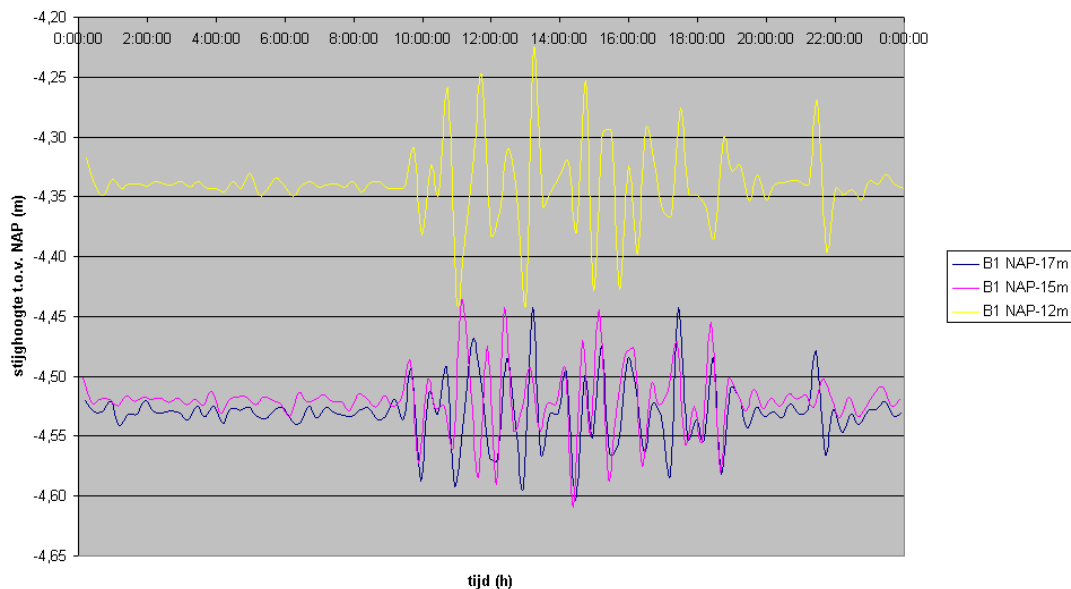




Figuur 8.6: waterstanden in de Hoge Vaart en op het Markermeer in week 24

### 8.4.2 Buitenhoofd

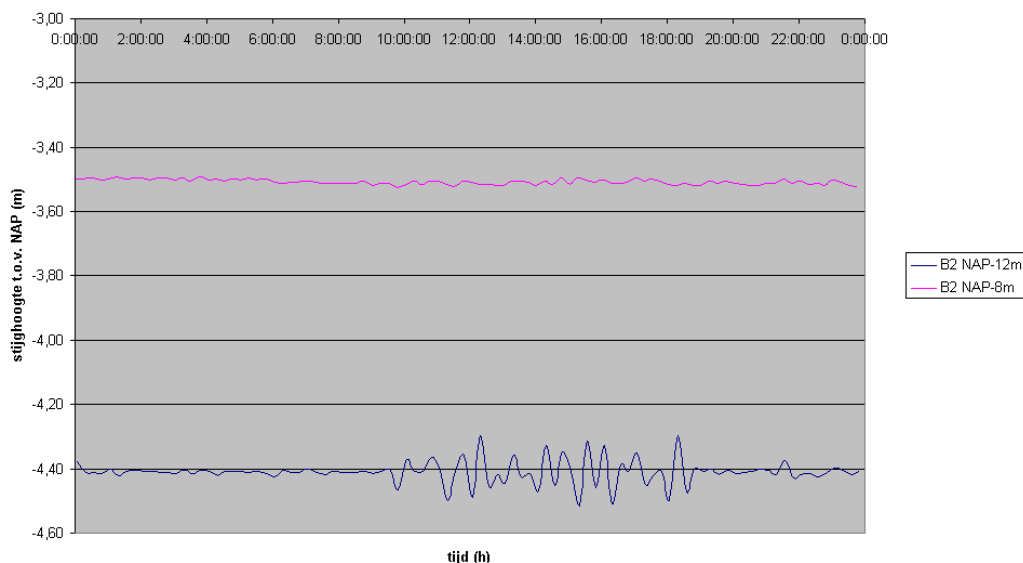
In paragraaf 7.3.3 is ingegaan op de vergelijking tussen de stijgbuizen onderling. Met deze vergelijking kan mogelijk inzicht worden verkregen in de stromingsrichting van het grondwater. Als eerste wordt gekeken naar de meetpunten B1, B2 en B3 die de situatie rond het buitenhoofd weergeven. Om wat overzichtelijker resultaten te krijgen wordt het stijghoogteverloop gedurende een etmaal weergegeven. Omdat het bij een vergelijking om de relatieve stijghoogten gaat heeft de keuze van de dag geen invloed.



Figuur 8.7: verloop van de stijghoogte in meetpunt B1 op 16 juni

In figuur 8.7 is wederom duidelijk de invloed van het schutten waarneembaar. Op NAP-12m is deze groter dan in de twee diepere buizen. Ook wordt duidelijk dat op grotere diepte de stijghoogte kleiner is. Op basis van de metingen is er stroming van niveau NAP-12m naar niveau NAP-17m. Achter scherm A stroomt het grondwater dus *omlaag*. Dit is volledig in tegenspraak met de hypothese in par. 7.3.3. Een

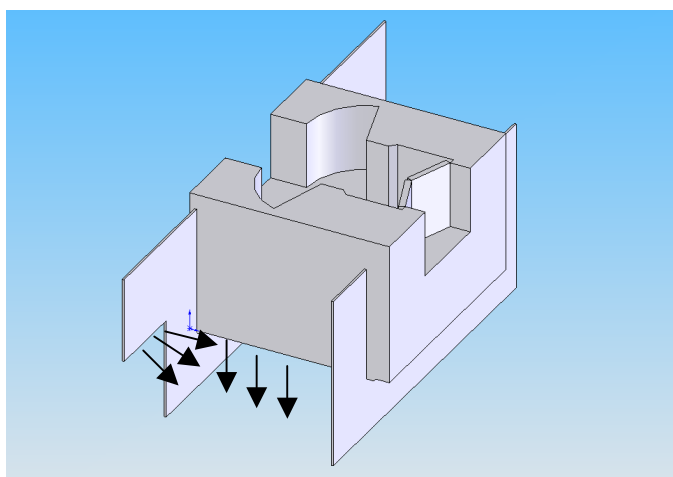
verklaring voor deze neerwaarts gerichte stroming wordt gevonden als ook de stijghoogte in meetpunt B2 in de beschouwing wordt betrokken (zie figuur 8.8.).



*Figuur 8.8: verloop van stijghoogte in meetpunt B2 op 16 juni*

In figuur 8.8 valt direct op dat de fluctuatie in stijghoogte overdag in de ondiepe filterbuis niet meer is terug te zien. Op niveau NAP-12m is deze fluctuatie wel terug te zien. De amplitude is ca. 10cm.

Ook opvallend is het grote potentiaalverschil. Aangezien het ondiepe filter ter plaatse van de trap in scherm A is geplaatst moet er stroming zijn vanaf deze trap in de richting van NAP-12m (zie figuur 8.9).



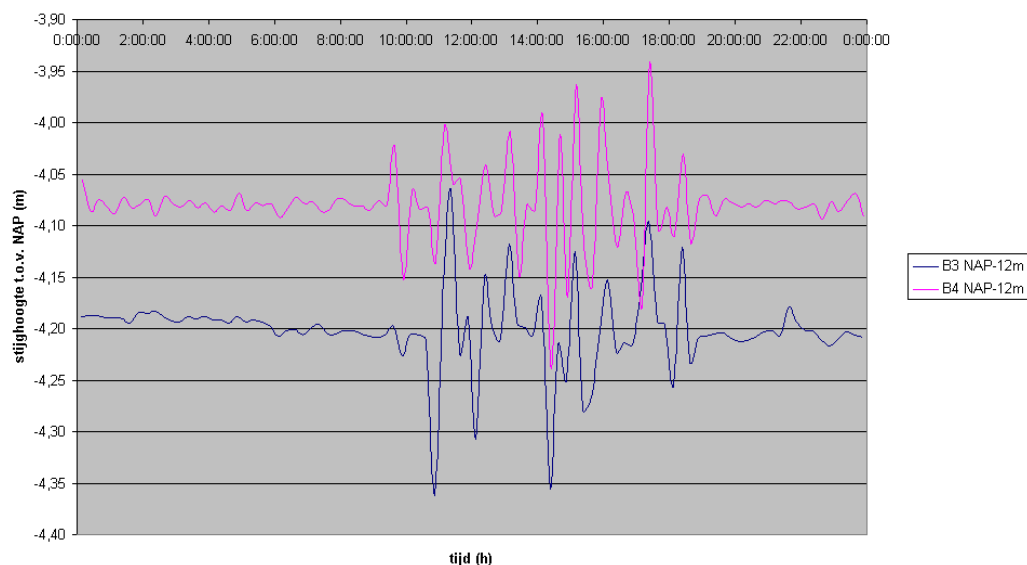
*Figuur 8.9: schematisering van grondwaterstroming t.p.v. het buitenhoofd*

De stijghoogte in B1 op NAP-12m is iets kleiner dan de stijghoogte in B2 op NAP-12m. Er is een groot verhang tussen NAP-8m en NAP-12m. Er is dus zowel stroming vanaf de trap in scherm A naar diepere grondlagen als stroming op niveau NAP-12m van B2 naar B1.



Dit verklaart waarom er vanaf NAP-12m ook stroming naar beneden is; het water dat door het scherm komt zijgt achter het scherm in.

Aan de binnenzijde van het buitenhoofd, ter hoogte van de aansluiting met de kolk, is meetpunt B3. Symmetrisch ten opzichte van de sluisas ligt meetpunt 4. Het stijghoogteverloop in beide punten is gegeven in figuur 8.10.



*Figuur 8.10: vergelijking stijghoogte B3 en B4 op 16 juni*

Het blijkt dat de stijghoogte in B4 gemiddeld ruim 15cm groter is dan in B3. De fluctuatie in de stijghoogte in beide punten verloopt in fase en is grofweg even groot. De hypothese was dat de grondwaterstand ter plaatse van B4 lager zou zijn dan in B3. Uit eerder onderzoek bleek namelijk de grondwaterstand in de omgeving van de sluis een licht verhang te hebben in de richting van de diepe polder. Het gaat echter om relatief klein verschil. Reeds door een iets andere bodemopbouw kan een dergelijke afwijking al ontstaan. Nader onderzoek naar het verschijnsel zal niet worden verricht.

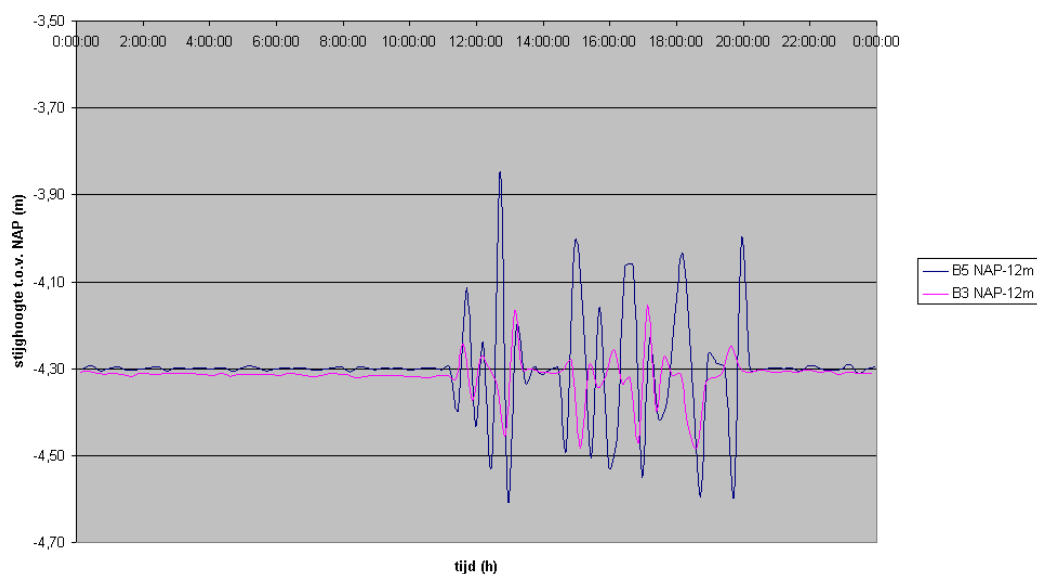
### 8.4.3 Schutkolk

Een vergelijking tussen B3 en B5 laat in detail hetzelfde beeld zien als reeds uit de verhanglijst bleek (zie figuur 8.11). Onder de sluis is naar alle waarschijnlijkheid een spleet aanwezig. De stroming verloopt via deze spleet. Het potentiaalverschil tussen de kolk bovenstrooms en benedenstrooms is nul.

In de resultaten van de eerste meetweek is de stijghoogte in B5 slechts 2mm groter dan in B3. In de tweede meetweek is dit 10mm.

Bij de bestudering van figuur 8.11 valt op dat de respons op schutten in B5 ruim 2 maal groter is dan in B3. Bovendien lijkt op de meeste momenten sprake van signalen in tegenfase. Aangezien de afstand van het filter tot de kolk voor beide meetpunten gelijk is kan hier de demping niet door worden verklaard. Een verklaring voor de grotere respons in B5 moet worden gezocht in de doorlatendheid van de bodem in de omgeving van het filter. Enkele meters boven het filter van B5 is enige klei aanwezig die er mogelijk de oorzaak van is dat zich druk kan opbouwen.

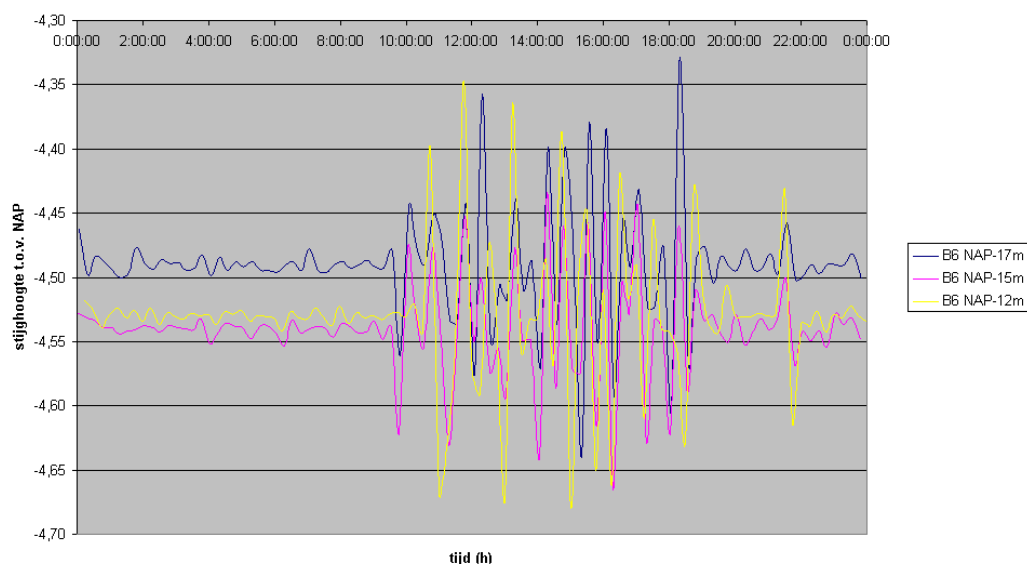
Om uitspraak te kunnen doen over vertraging tussen B3 en B5 is de meting te grof. Voor nader onderzoek op dit gebied wordt verwezen naar figuur 9.5 in paragraaf 9.2.



*Figuur 8.11: stijgheogteverloop in de punten B3 en B5*

#### 8.4.4 Binnenhoofd

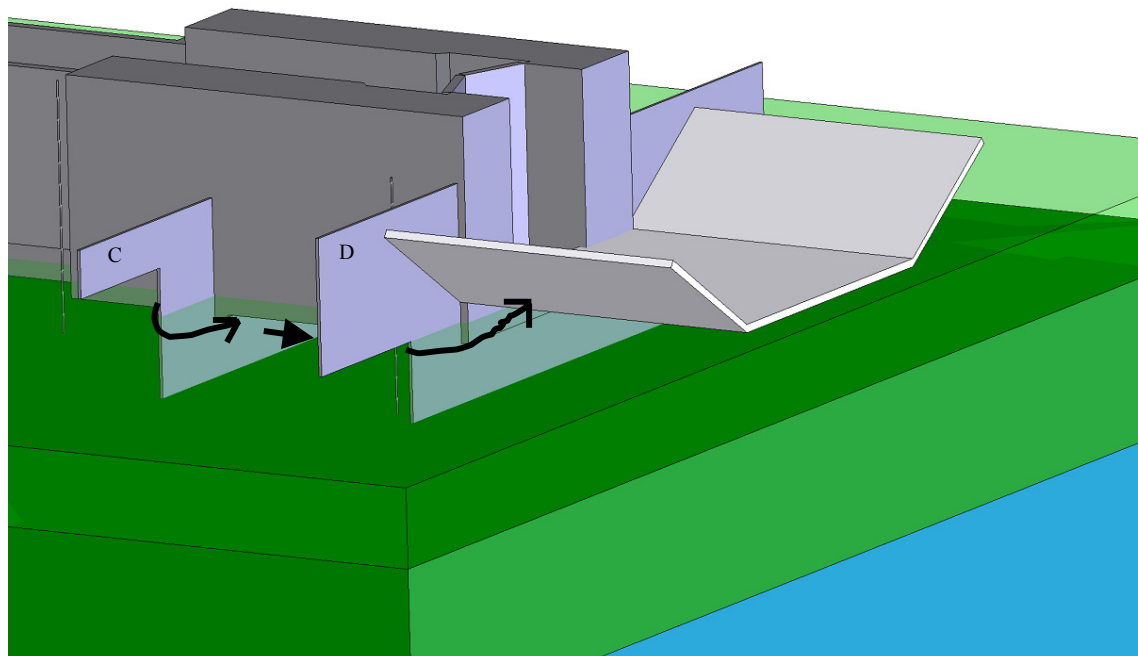
De stroming naast het binnenhoofd kan worden geanalyseerd aan de hand van de gegevens van B5 en B6. B5 is reeds weergegeven in fig. 8.11. De gegevens van de drie filters in B6 staan in fig. 8.12. De stijgheogte in B5, bovenstrooms van scherm C, ligt rond NAP-4m. De stijgheogten in B6 zijn minimaal 40cm kleiner. Er moet dus sprake zijn van stroming in de richting van B6. Dit is in lijn met de verwachting.



*Figuur 8.12: stijgheogten in B6 op 16 juni*

De grondwaterstand in B6-diep ligt hoger dan in B6-ondiep. Dit betekent dat er een geringe stroming is in de richting van NAP-12m. B6 is geplaatst in de buurt van de trap in scherm D. Hier verspringt het scherm van NAP-17m tot een diepte van NAP-12m. Het meetresultaat duidt op stroming uit diepere lagen (NAP-17m) in de richting

van de trap. Dit zou betekenen dat er toch water onder scherm C door stroomt, dat vervolgens ter plaatse van de trap in scherm D uittreedt. Als er alleen stroming zou zijn door de spleet is stroming van diep naar ondiep niet logisch. Evenals bij B1 is bij B6 de fluctuatie in stijghoogte van de buis met het filter op niveau NAP-12m het sterkst.



*Figuur 8.13: stroming rond de schermen C en D onder het binnenhoofd. Uitstroom door het talud, het effect van de keileem is hier niet meegenomen in de beschouwing.*

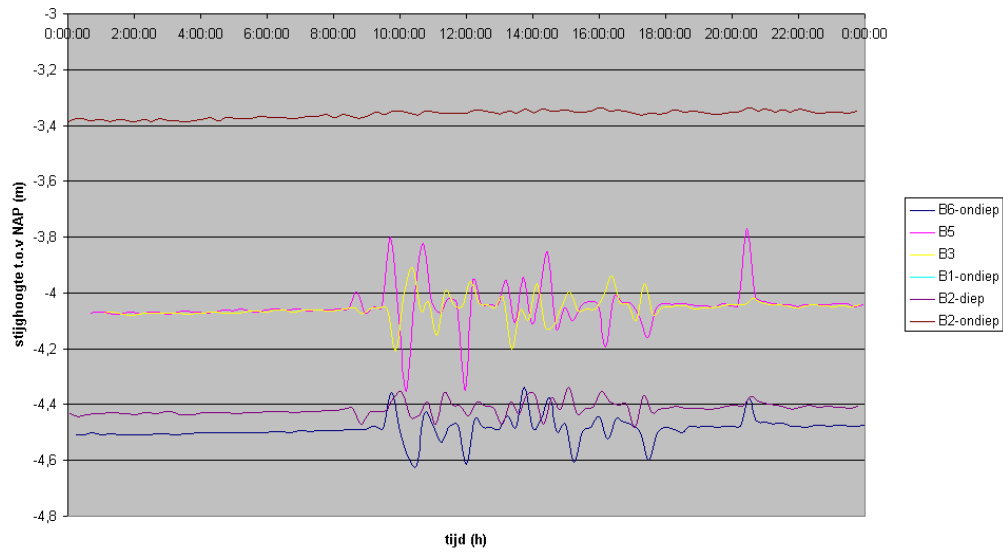
Van de nog aanwezige peilbuis M1 is de waarde NAP-4,22m bekend (zie figuur 7.1). De grondwaterstand is hier dus ca. 30cm hoger dan in B6. Dit betekent dat er stroming zal zijn in de richting van B6. Het is aannemelijk dat ook hier het water de makkelijkste route kiest en via het ondiepe deel van scherm D richting binnenwater stroomt. Gezien de ligging van het meetpunt is ook stroming om het scherm heen niet uit te sluiten.

Eén van de vragen in hoofdstuk 6 is de veiligheid tegen het mechanisme heave. De meest ongunstige situatie hierbij is die waarbij de keileemlaag aan de benedenstroomse zijde van de sluis ontbreekt, of niet meer functioneert. De grondwaterstand aan de onderzijde van scherm D is af te leiden uit de stijghoogte gemeten in B6-diep. Deze is gemiddeld NAP-4,5m. De laagst gemeten waarde is NAP-4,77m. Met deze extreme waarde wordt getoetst op heave, uitgaande van een polderpeil van NAP-5,20m.

$$i_{opt} = \frac{\phi_{B6-diep} - h_p}{d} = \frac{-4,77m - -5,20}{8,20m} m = 0,053 \ll 0,5$$

Het toelaatbare verhang van 0,5 is ruim 9 maal groter. De veiligheid tegen het mechanisme heave is dus ruim voldoende.

Tot slot van deze paragraaf is een aantal grafieken samengevoegd zodat een totaalbeeld ontstaat van het stijghoogteverloop rond de Zuiderluis (figuur 8.14).



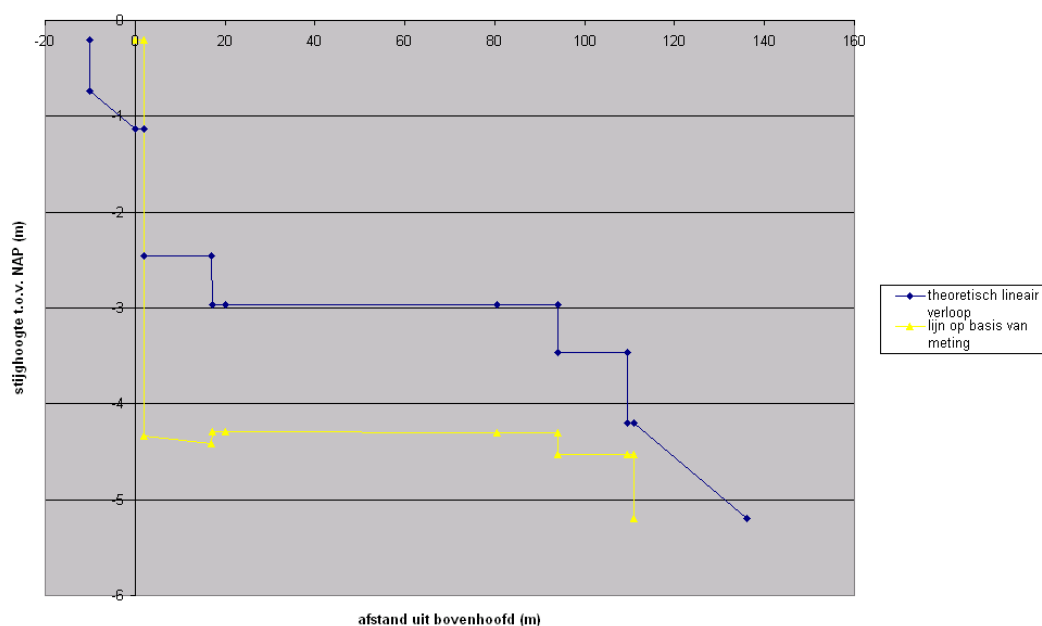
*Figuur 8.14: stijghoogteverloop in enkele meetpunten op 16 juni*

Duidelijk blijken de achterloopsheid naast het binnenhoofd (vergelijk B1-ondiep en B2-diep) en het nagenoeg nul zijn van het potentiaalverschil over de sluiscolk (vergelijk B3 en B5).

## 8.5 Invloed van de keileemlaag op het verhang

### 8.5.1 Inleiding

In paragraaf 8.3 is geconcludeerd dat het gezamenlijk effect van de keileemlaag en scherm A een afname in het verval van 4 meter geeft. De invloed van de schermen B en C is zeer beperkt. Dit valt te verklaren door de geringe breedte van de schermen op het niveau waar de meeste stroming plaats vindt (rond NAP-11m). Scherm D is duidelijker terug te zien als een sprong in de verhanglijn. Ook benedenstrooms bevindt zich echter een keileemlaag (zie bijlage 13). Het verval over scherm D van ca. 0,75m hoeft dus niet alleen door het scherm veroorzaakt te worden. Als de keileemlaag benedenstrooms al een rol speelt is het effect er van in ieder geval veel geringer dan dat van de bovenstroomse laag. Dit kan betekenen dat de benedenstroomse laag minder of zelfs helemaal niet meer functioneert. Ook is het mogelijk dat grondwater boven de laag uittreedt. Deze conclusie lijkt nog meer voor de hand te liggen als meegenomen wordt dat de lengte van de benedenstroomse laag maar liefst 25m is. Bij een goede werking van deze laag zou, bij een lineaire benadering van het probleem, het effect er van 2,5 maal dat van de bovenstroomse laag moeten zijn (zie figuur 8.14). De theoretische verhanglijn op basis van een werkende keileemlaag benedenstrooms lijkt echter totaal niet op de gemeten situatie.

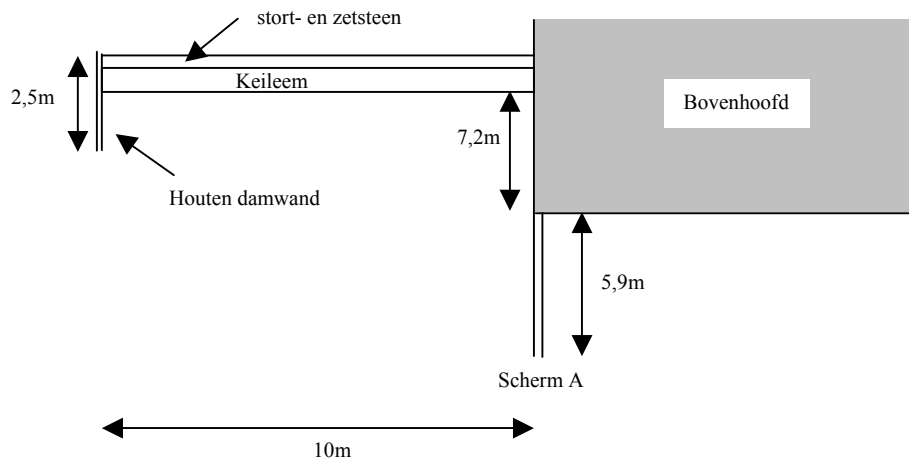


Figuur 8.14: verhanglijn met theoretische invloed van bovenstroomse en benedenstroomse keileemlaag

In deze paragraaf wordt getracht het verloop van de verhanglijn, zoals deze door meting is bepaald, met de theorie van Lane (lineaire afname van het verhang over de lengte van de kwelweg) te reconstrueren. Mogelijk dat hiermee uitspraak kan worden gedaan over de juistheid van de theorie met betrekking tot de invloed van een horizontale laag als kwelremmer.

### 8.5.2 Analyse

Allereerst wordt de constructie van de bovenstroomse keileemlaag nader onderzocht. Een overzichtstekening van de laag is gegeven in bijlage 13, met behulp van de gegevens uit de tekening is de schematische doorsnede in figuur 8.15. getekend.

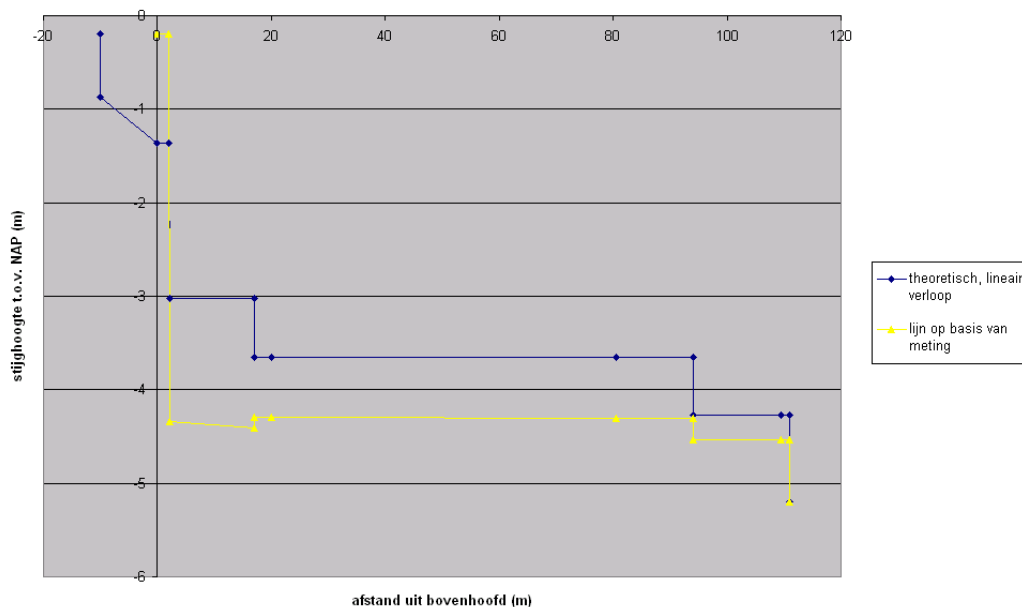


Figuur 8.15: schematische doorsnede over de bovenstroomse keileemlaag, ter plaatse van sluisas. De dikte van de keileemlaag is circa 1m.

Bij bestudering van tekening ZZWXT000146 [2] blijkt voor de keileemlaag nog een houten damwand aanwezig te zijn. Over de functie van dit scherm bestaat enige onduidelijkheid. Waarschijnlijk is de primaire functie niet die van kwelvoorziening maar dient het om de lagen keileem, stort- en zetsteen op te sluiten en uiteenvallen van de bodembescherming/filterlaag te voorkomen. Het effect van de houten damwand als kwelvoorziening wordt bij de berekening van de verhanglijn wel meegenomen.

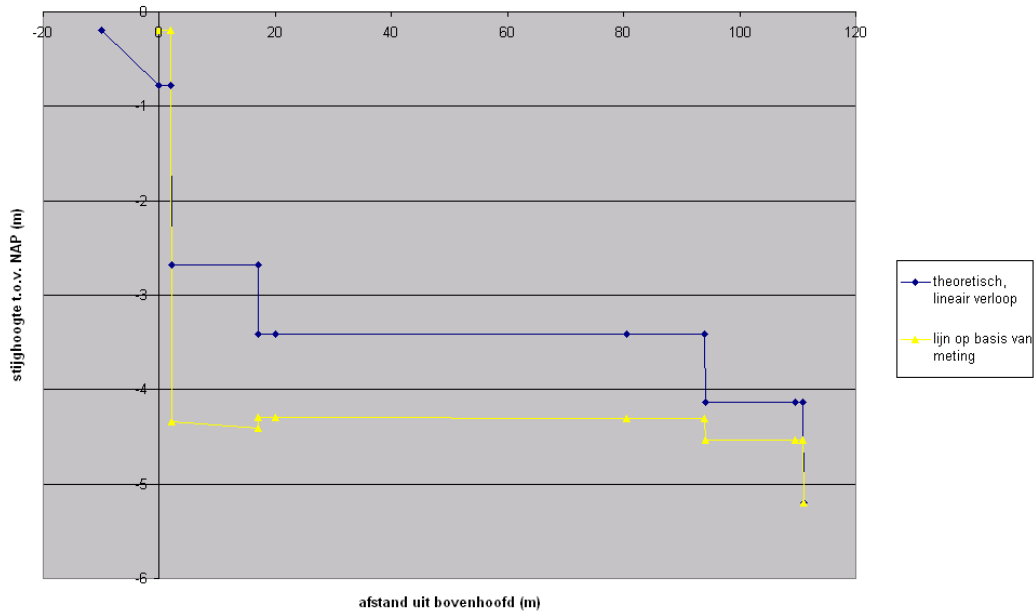
Meenemen van de invloed van de keileemlaag als volledig afsluitende laag in de kwelweganalyse komt volgens Lane neer op het in rekening brengen van de lengte van de laag vermenigvuldigd met de factor 1/3.

Het totaal van houten scherm en keileemlaag levert de verhanglijn uit figuur 8.16.



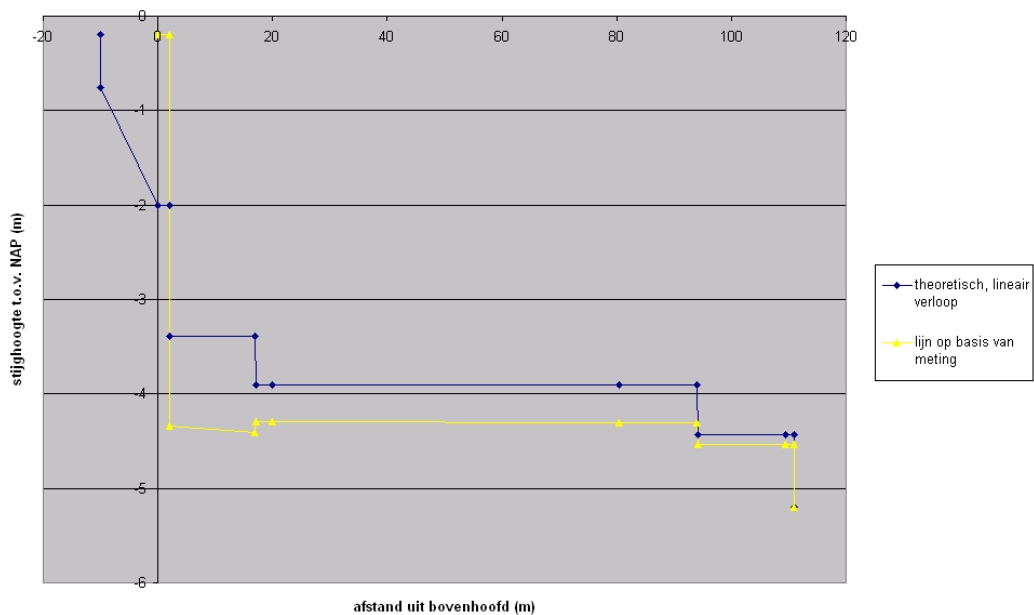
Figuur 8.16: verhanglijn met invloed houten scherm en bovenstroomse keileemlaag.

Voor de volledigheid is ook de situatie zonder houten scherm doorgerekend. Het resultaat hiervan is weergegeven in figuur 8.17.



Figuur 8.17: verhanglijn met enkel de invloed van de keileemlaag.

Zowel de verhanglijn in figuur 8.16 als die in figuur 8.17 komt niet overeen met de lijn zoals deze met behulp van de meetresultaten is vastgesteld. Het gezamenlijk verval over de keileemlaag en scherm A is zelfs met de invloed van het houten scherm beperkt tot ca. 3 meter. In werkelijkheid wordt over scherm A ca. 4m gemeten. De vervallen over de overige schermen zijn in deze situatie ook veel groter dan door meting is vastgesteld.



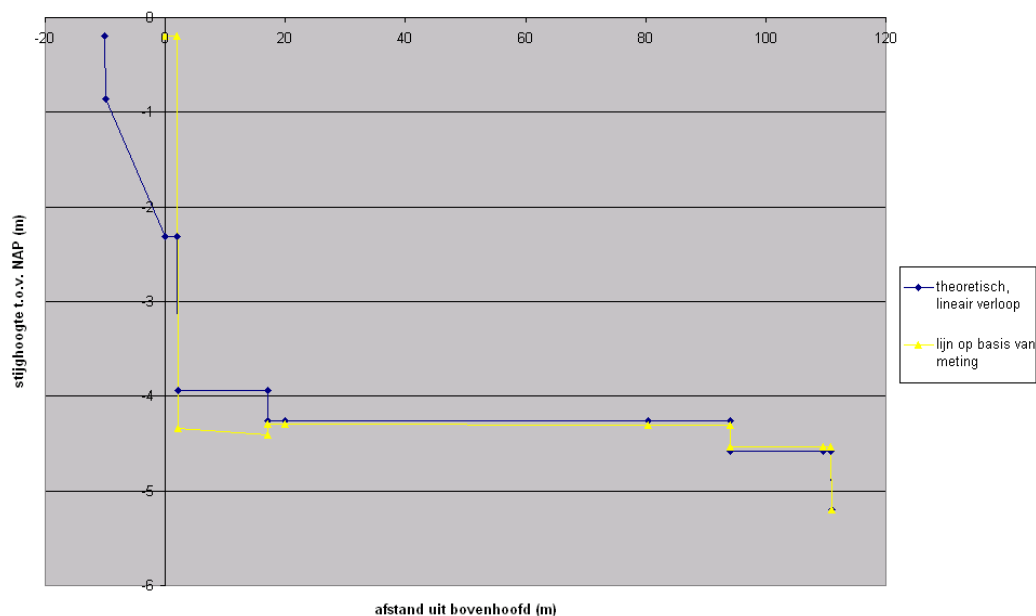
Figuur 8.18: verhanglijn met invloed houten scherm, zonder factor 1/3 voor de bovenstroomse keileemlaag.

Als tweede stap is de invloed van de factor 1/3 onderzocht. Omdat de verhanglijn uit figuur 8.16 veel afwijkt van de gemeten situatie wordt in figuur 8.18 de verhanglijn gegeven in de situatie dat de volledige 10 meter onder de keileemlaag wordt meegerekend in de kwelweg. Er wordt dus afgeweken van de methode van Lane. Een horizontaal afdichtende laag wordt volledig meegenomen in de bepaling van de maatgevende kwelweg.

Als zowel de invloed van het houten scherm als de volledige invloed van de keileemlaag wordt meegenomen in de berekening van de verhanglijn ontstaat figuur 8.18. Deze komt het meest overeen met de verhanglijn op basis van de meetresultaten. Omdat de kwelweg ter plaatse van scherm A (bijdrage aan kwelweg 11,1m) en de lengte van de keileemlaag (bijdrage 10m) in dezelfde orde liggen is hun bijdrage aan het verhang dat ook.

De grondwaterstand ter plaatse van meetpunt B1 is volgens figuur 8.17 NAP-3,4m. De gemiddelde waarde volgens de meetresultaten is NAP-4,4m. Er is dus nog steeds een verschil van ca. 1 meter. De grootte van het verval over de andere schermen komt nu wel dichterbij de gemeten waarde. Over scherm C staat een verval van 0,5m tegen een gemeten gemiddelde waarde van 0,45m en over scherm D staat een verval van 0,8m tegen een gemeten waarde van 0,7m.

Om toch een zelfde verhanglijn te krijgen als uit de meetresultaten komt wordt figuur 8.18 nog een beetje gemanipuleerd. De totale kwelweg wordt verkort door de route rond de schermen B, C en D elk met 2 meter te verkorten. De invloed van scherm A en de keileemlaag wordt hiermee kunstmatig vergroot. Met de genoemde aanpassing blijkt de theoretische verhanglijn redelijk overeen te komen met de verhanglijn zoals die op basis van de meetgegevens is bepaald (zie figuur 8.19).



*Figuur 8.19: aangepaste verhanglijn, beperking van de invloed van de schermen B, C en D.*



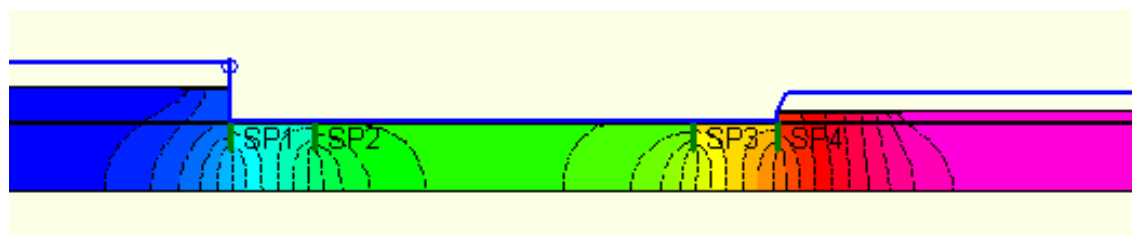
Er kan geconcludeerd worden dat de invloed van de keileemlaag erg groot is. Hoe groot deze is zou gemeten kunnen worden met een extra peilbuis net voor het buitenhoofd. Deze moet door de keileemlaag worden aangebracht, en een filter hebben dat net onder de keileemlaag is aangebracht.

Betreffende de totale veiligheid van het kunstwerk op het gebied van piping kan geconcludeerd worden dat er extra veiligheid is ingebouwd. Er is immers sprake van functionerende schermen (zie sprongetjes in verhanglijn op basis van meetresultaten) maar ze behoeven niet ten volle uitgenut te worden, vanwege het resterende verhang van slechts 1 meter dat verdeeld kan worden over drie schermen.

Op basis van de metingen kan de conclusie worden getrokken dat de benedenstroomse keileemlaag met een zelfde opbouw als de bovenstroomse, maar een twee keer zo grote lengte, niet naar behoren functioneert. Een mogelijke oorzaak kan zijn dat het water om scherm D heen, boven de keileemlaag uittreedt en deze daardoor geen bijdrage meer levert aan de lengte van de kwelweg.

### 8.5.3 Tweedimensionale analyse met M-seep

Reeds in eerdere stadia van het onderzoek (o.a. opstellen van het meetplan, hoofdstuk 6) is gebruik gemaakt van een grondwaterstromingsanalyse in het computerprogramma M-seep. Ook nu wordt voor een eerste indruk gebruik gemaakt van een 2D analyse in een vlak onder de sluis. Als bodemmateriaal is gekozen voor zand met een horizontale en verticale doorlatendheid van  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s. De spleet tussen de constructie en de ondergrond is gemodelleerd als een laag grind van 20cm met een doorlatendheid van  $k = 1 \cdot 10^{-1}$  m/s. De keileemlaag is bovenstrooms 10 meter lang en 0,5m dik. Benedenstrooms is de dikte gelijk aan bovenstrooms, echter hier is de laag 25 meter lang. De keileem is gemodelleerd als klei met een doorlatendheid van  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s. Het resultaat is weergegeven in figuur 8.20.

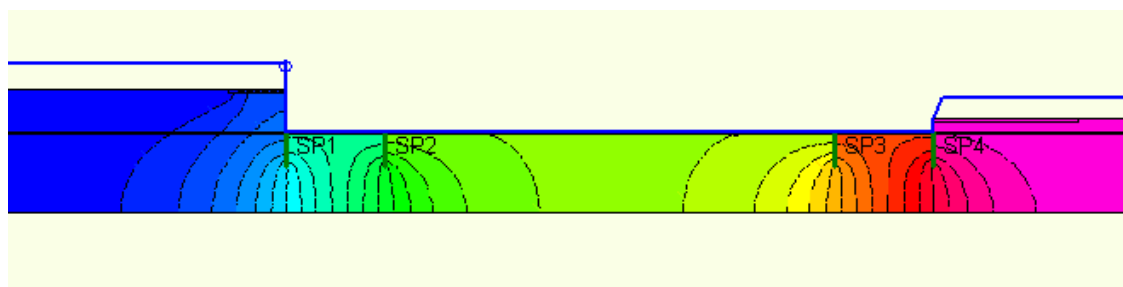


*Figuur 8.20: potentiaallijnen bij twee werkende keileemlagen. Uitvoer M-seep*

De stijghoogte bovenstrooms van scherm D (SP4 in fig. 8.20) komt in deze analyse op ongeveer NAP-3,40m. Dit is een behoorlijke afwijking ten opzichte van de gemeten waarde van NAP-4,50m.

Zoals eerder in de paragraaf opgemerkt bestaat het vermoeden dat de benedenstroomse keileemlaag niet meer functioneert. Ook dit is in M-seep gemodelleerd. De benedenstroomse keileemlaag wordt verwijderd en vervangen door zand met dezelfde eigenschappen als de rest van de bodem. Het resultaat is te vinden in figuur 8.21. De stijghoogte wordt in dit geval berekend op NAP-4,20m. De afwijking ten opzichte van de gemeten stijghoogte van NAP-4,50m in B6 is nu nog maar 30cm. De waarde komt wel exact overeen met de stijghoogte zoals gemeten in

buis M1. Hoewel sprake is van een 2D benadering kan toch geconcludeerd worden dat de situatie met een defecte benedenstroomse keileemlaag beter overeen komt met de gemeten situatie dan die van een functionerende laag.



*Figuur 8.21: potentiaallijnen bij een niet werkende keileemlaag benedenstrooms. Uitvoer M-seep.*

In het model is de stijghoogte achter scherm A (SP1 in fig. 8.20 en 8.21) beide keren ongeveer gelijk en bedraagt ca. NAP-0,70m. Deze waarde komt in het geheel niet overeen met de gemeten stijghoogte op deze plaats van NAP-4,30m. Een verklaring hiervoor kan worden gezocht in de schematisering tot tweedimensionaal probleem. Ook een verschil in doorlatendheid kan een rol spelen. Op geen enkele manier echter kon de situatie rond scherm A, zoals deze is gemeten, worden benaderd met M-seep.

#### **8.5.4 Sliblagen**

Een mogelijke verklaring voor de extreem goed afdichtende werking van de bovenstroomse keileemlaag is de aanwezigheid van sliblagen op de bodem van het Markermeer. Ontgrondingsprojecten in het Markermeer en IJsselmeer hebben dit in het verleden uitgewezen. Door heel kleine slibdeeltjes wordt de bodem als het ware dichtgeseald. Na doorbreken van een dergelijk laagje wordt dit op natuurlijke wijze zeer snel hersteld. Hiermee kan de duurzame werking van een dergelijke laag worden verklaard.

#### **8.6 Literatuur**

- [1] Toetsrapport bijzondere locatie De Blocq van Kuffeler, Royal Haskoning oktober 2002
- [2] Tekening ZZWXT000146, overzicht, grondwerken en boringen
- [3] Grondmechanica, A. Verruijt; Delft University Press 1999

## H9 Resultaten van meting met hogere frequentie

### 9.1 Aanpassingen

Na de eerste meetweek volgde direct een tweede, waarbij de instelling van de divers gehandhaafd bleef. Na uitwerking bleken de resultaten grofweg overeen te komen met de resultaten van de eerste week. Nog tijdens de analyse van de eerste meetgegevens is besloten de instellingen voor week drie te wijzigen. De belangrijkste reden was het achterhalen van het grote verschil tussen het verloop van de stijghoogte overdag en 's nachts. In paragraaf 8.3.2 is uitgelegd dat het verschil wordt veroorzaakt door het 'stampen' van de kolk als gevolg van het schutten. Om dit oordeel beter te kunnen onderbouwen is het meetprogramma voor meetweek drie op twee punten aangepast.

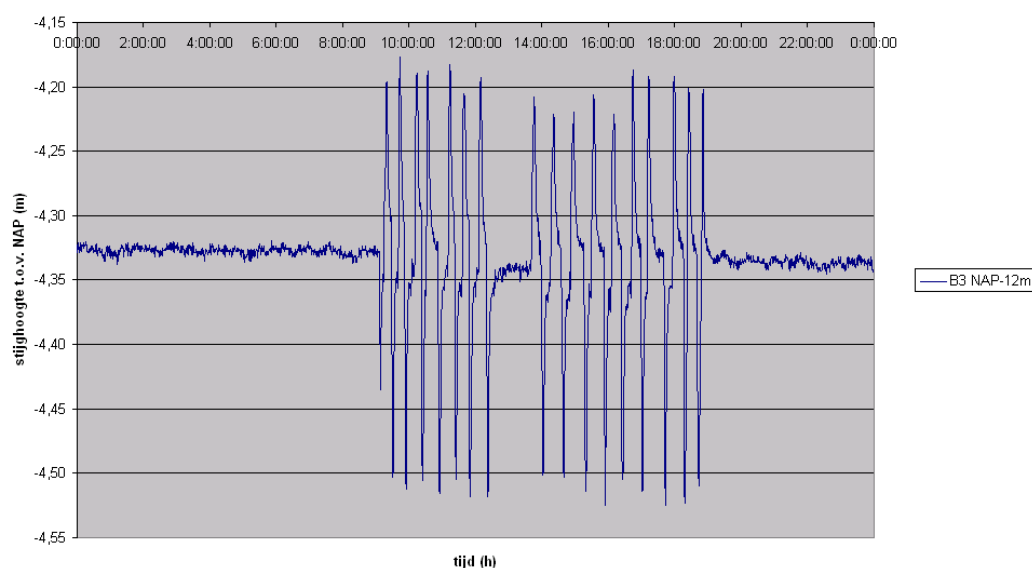
1. In plaats van elk kwartier een meting wordt nu om de 50 seconden een registratie van de stijghoogte gedaan.
2. In plaats van elke nacht een volle kolk wordt nu twee nachten de kolk leeg (d.w.z. op polderpeil) gehouden. In de nacht van dinsdag op woensdag en donderdag op vrijdag is dit gerealiseerd. Andere nachten stond de kolk vol.

Met de aanpassingen wordt beoogd de fluctuatie in de stijghoogte overdag nauwkeuriger te meten in de hoop hiermee een lekkage als mogelijke oorzaak definitief uit te sluiten.

Opgemerkt wordt dat peilbuizen niet het geijkte instrument zijn voor het waarnemen van snelle fluctuaties. Het filter van een peilbuis heeft een behoorlijke inhoud, zodat relatief veel grondwater toe of weg moet stromen voor een stijging of daling van het grondwater wordt geregistreerd. Veel beter kan daarom gebruik gemaakt worden van waterspanningsmeters. Om te testen wat de mogelijkheden zijn van de geïnstalleerde apparatuur worden de wijzigingen ondanks de beperkingen er van doorgevoerd.

### 9.2 Resultaten van de aangepaste metingen

Met het aangepaste meetprogramma uit paragraaf 9.1 is een week lang gemeten. In deze paragraaf worden de meetresultaten geanalyseerd.

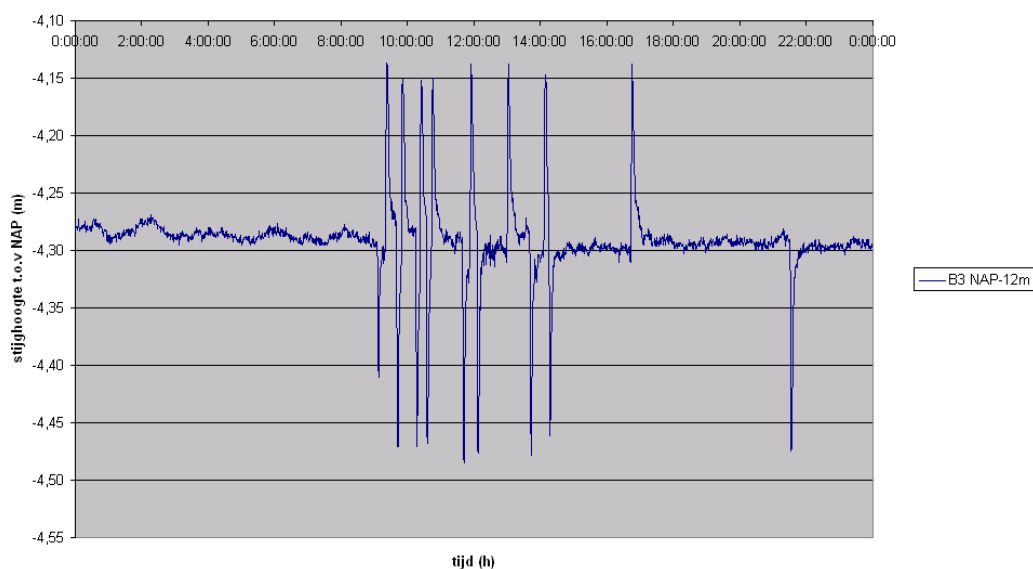


Figuur 9.1: verloop stijghoogte in meetpunt B3 op zondag 10 juli 2005

Uit alle voorgaande grafieken blijkt er een grote variatie te zijn in maxima en minima van de stijghoogte per peilbuis. Bij een grotere meetfrequentie blijkt een veel nauwkeuriger registratie van het stijghoogteverloop mogelijk te zijn, zie figuur 9.1. Het is bij gebruik van peilbuizen niet te verwachten dat het werkelijke maximum en minimum worden waargenomen. Uit de metingen volgen slechts een ondergrens voor de maxima en een bovengrens voor de minima.

In plaats van een heel grof, wisselend beeld met telkens verschillende amplitude ontstaat een verloop waarin elke vul- en ledig beweging is te herkennen. Door de veel kortere periode tussen twee metingen (50 s) wordt de resolutie groter. De frequentie van de meting wordt voldoende groot ten opzichte van de frequentie van het schutproces (ca. 8min.). Zelfs de sperperiode rond 13:00, waarin niet wordt geschut, is met deze instelling van de apparatuur in figuur 4.1 te herkennen.

Als met behulp van de schutgegevens, die worden bijgehouden door de sluiswachters, figuur 4.1 wordt gecontroleerd, blijkt dat de maxima en minima exact overeenkomen met respectievelijk het vullen en ledigen van de kolk. Als extra illustratie dient figuur 9.2, waarin duidelijk zichtbaar is dat de kolk om 21:40 wordt leeggezet, precies zoals was afgesproken. Leegzetten leidt tot ontlasten en derhalve tot een kortdurende daling van de grondwaterstand. Na 15 minuten is de grondwaterstand weer nagenoeg op het oude niveau.



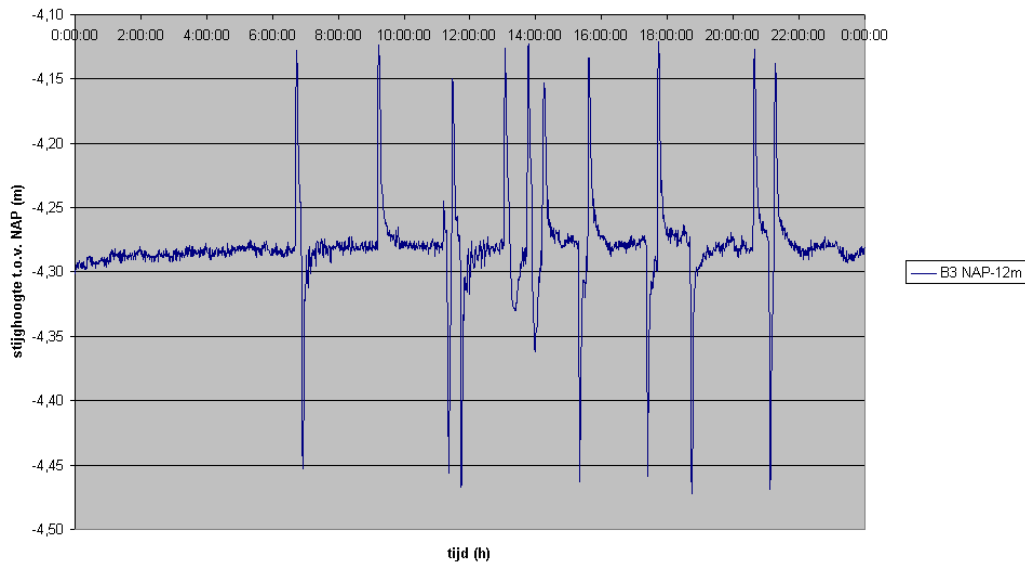
*Figuur 9.2: verloop stijghoogte in meetpunt B3 op dinsdag 5 juli 2005*

Het doel van de aangepaste meting is het met zekerheid vast kunnen stellen van het niet lek zijn van de sluis. Hiertoe is twee nachten de sluis kolk leeg gehouden. Om de invloed van het leeg ‘wegzetten’ van de kolk te onderzoeken wordt de grafiek van meetpunt B3 op woensdag 6 juli in de beschouwing betrokken (zie figuur 9.3).

De eerste paar uur na het leeg achterlaten van de sluis blijft de waterstand op hetzelfde niveau (NAP-4,29m). Heel langzaam stijgt de grondwaterstand tot niveau NAP-4,28m. Bij een lekkage van de sluis kolk onder niveau NAP-4,30m zou de grondwaterstand tijdens leegstand moeten dalen als gevolg van water dat de kolk

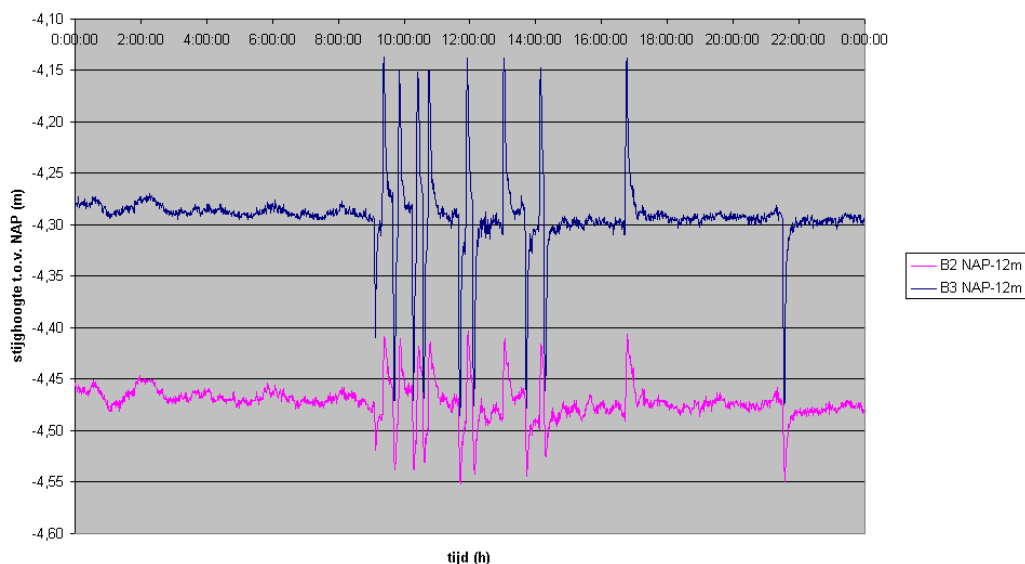
instroomt. Tevens blijkt de grondwaterstand tijdens een nacht met volle kolk nauwelijks af te wijken van die met een lege kolk.

Het verloop van de stijghoogte in figuur 9.2 is niet enkel van toepassing op meetpunt B3, alle andere meetpunten laten een zelfde beeld zien. De afstand uit de sluiswand is hierbij bepalend voor de mate van demping.



*Figuur 9.3: verloop stijghoogte in meetpunt B3 op woensdag 6 juli 2005*

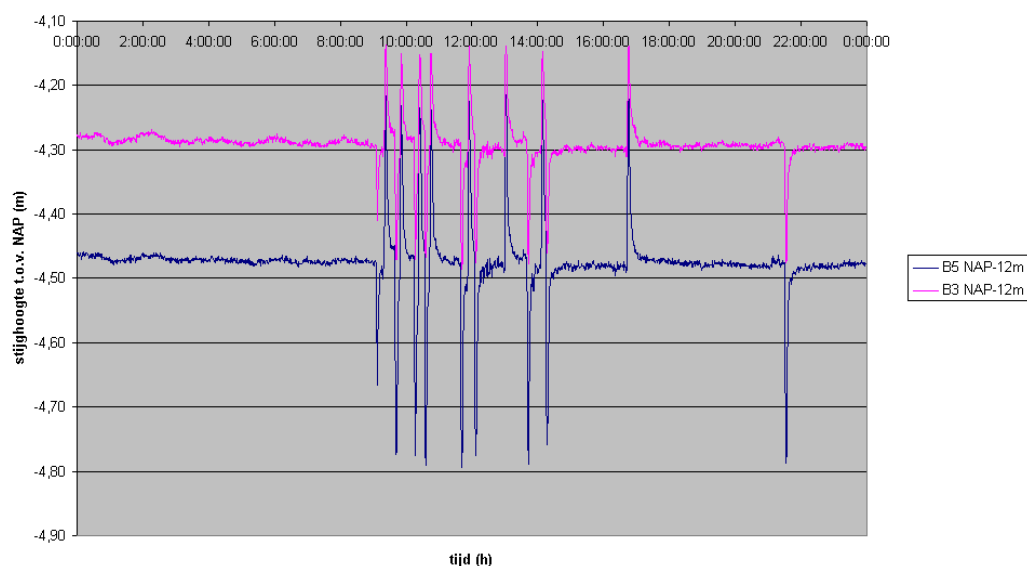
Ook de tijdstippen van de maxima en minima zijn in alle buizen gelijk (zie bijvoorbeeld B2 en B3 in figuur 9.4). Het zand is blijkbaar dermate goed doorlatend dat geen vertraging optreedt. Demping, als gevolg van de grotere afstand van B2 tot de sluis, is er wel. De amplitude van B2 is ca. 5cm, terwijl de amplitude van B3 bijna 15cm is.



*Figuur 9.4: vergelijking tussen de buizen B2 en B3*

In paragraaf 8.4.3 werd geconcludeerd dat de stijghoogten in B3 en B5 niet in fase zijn. De pieken en dalen lijken telkens iets verschoven te liggen ten opzichte van

elkaar. Er is niet gezocht naar een verklaring omdat het beeld vertekend kan zijn door de redelijk grove registratie om de 15 minuten. Nu er beschikking is over een veel gevoeliger meting wordt dit gecontroleerd. Figuur 9.5 geeft de vergelijking tussen B3 en B5 op dinsdag 5 juli.

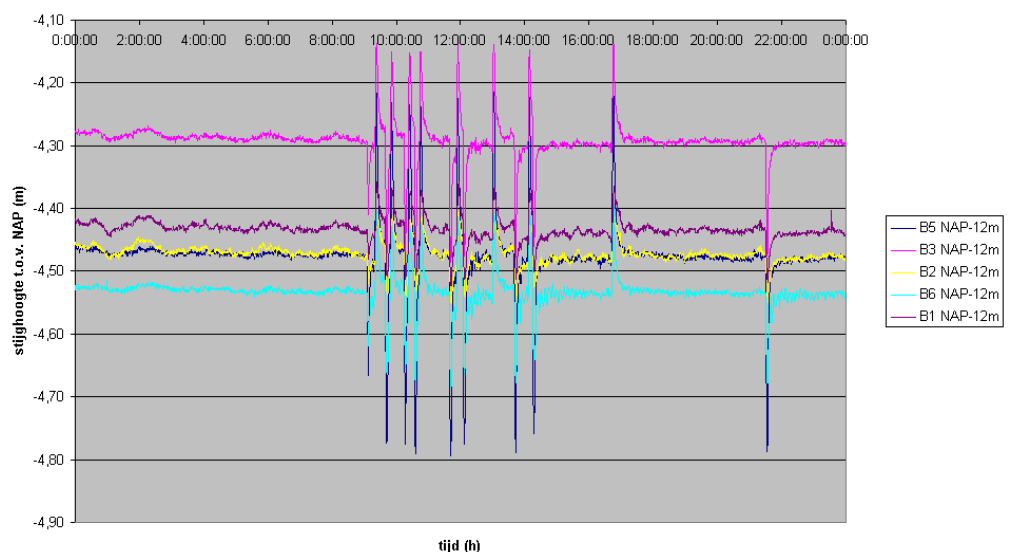


*Figuur 9.5: verloop van de grondwaterstand in B3 en B5 op dinsdag 5 juli*

Op basis van figuur 9.5 mag geconcludeerd worden dat er geen sprake is van vertraging. De conclusie over grotere demping in B3 blijft van kracht. Wel blijkt de stijghoogte in B3 ongeveer 20 centimeter groter te zijn dan in B5. Dit betekent een verhang van  $\frac{0,2m}{65m} = 3,1 \cdot 10^{-3}$  hetgeen nog steeds verwaarloosbaar klein is.

### 9.3 Invloed legen en vullen van de kolk op de stijghoogte

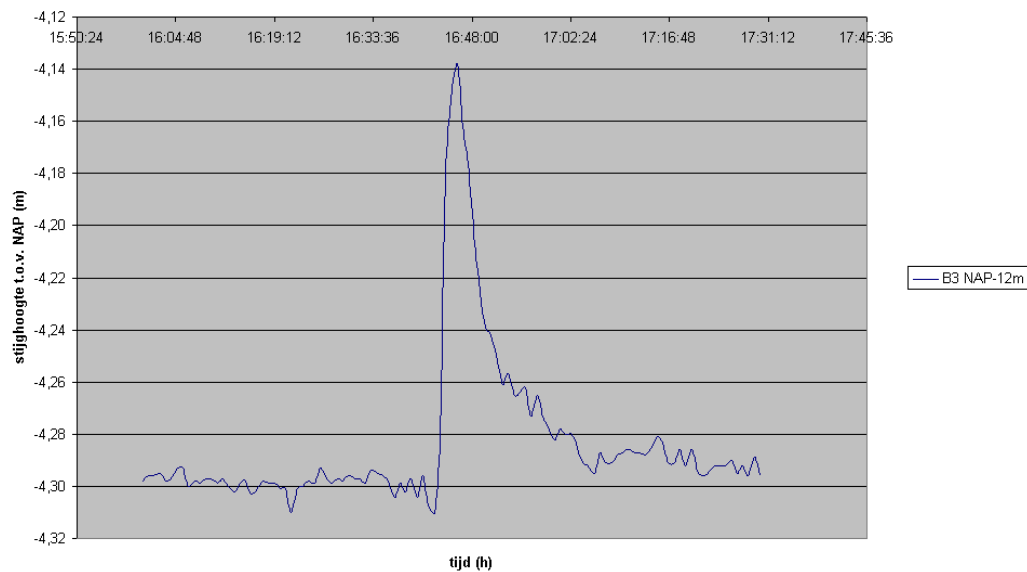
In figuur 4.6 is een aantal grondwaterpatronen samengevoegd. Qua vorm zijn deze identiek. Hier blijkt weer het belang van de grotere meetfrequentie als de figuur wordt vergeleken met fig. 8.13. Uit deze figuur kon dit duidelijk niet worden geconcludeerd



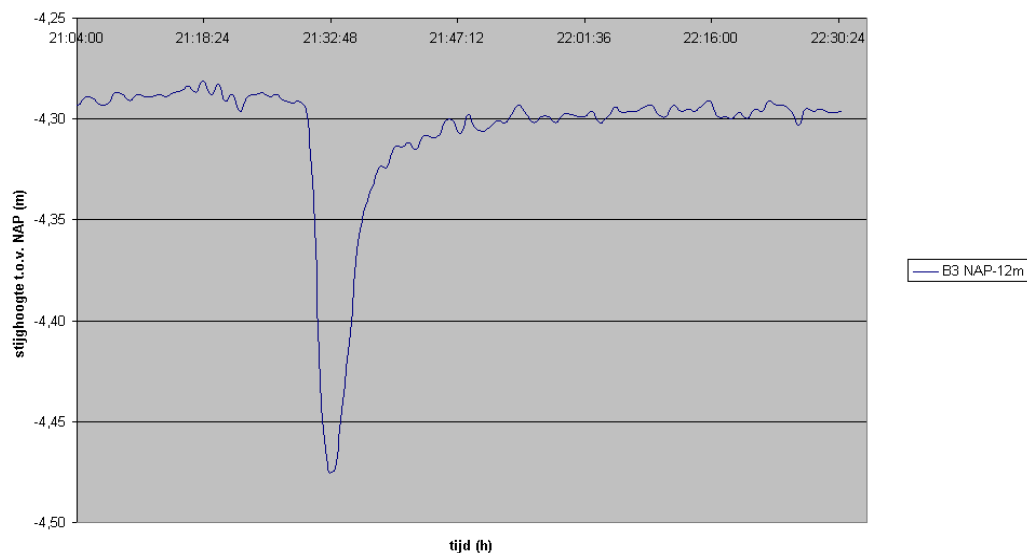
*Figuur 9.6: grondwaterpatronen*

Indien de grondwaterstandverhogingen in de peilbuizen een gevolg zouden zijn geweest van lekkages zouden de grondwaterpatronen (figuur 9.6) nooit identiek kunnen zijn. Er zou sprake moeten zijn van enige vertraging tussen de pieken en de dalen. Voor een grondwaterstandverhoging of -verlaging als gevolg van een lekkage is immers grondwaterstroming nodig, hetgeen tijd vergt [1].

Omdat met een behoorlijk frequentie de stijghoogte wordt bepaald kan de repons op het legen en vullen van de kolk ook in detail worden bekeken. Hiertoe worden het maximum rond 16:30 en het minimum rond 21:30 uit figuur 9.2 nader bekeken. De figuren 9.7 en 9.8 geven het resultaat.



Figuur 9.7: verloop van de grondwaterstand in B3 tijdens het vullen van de kolk



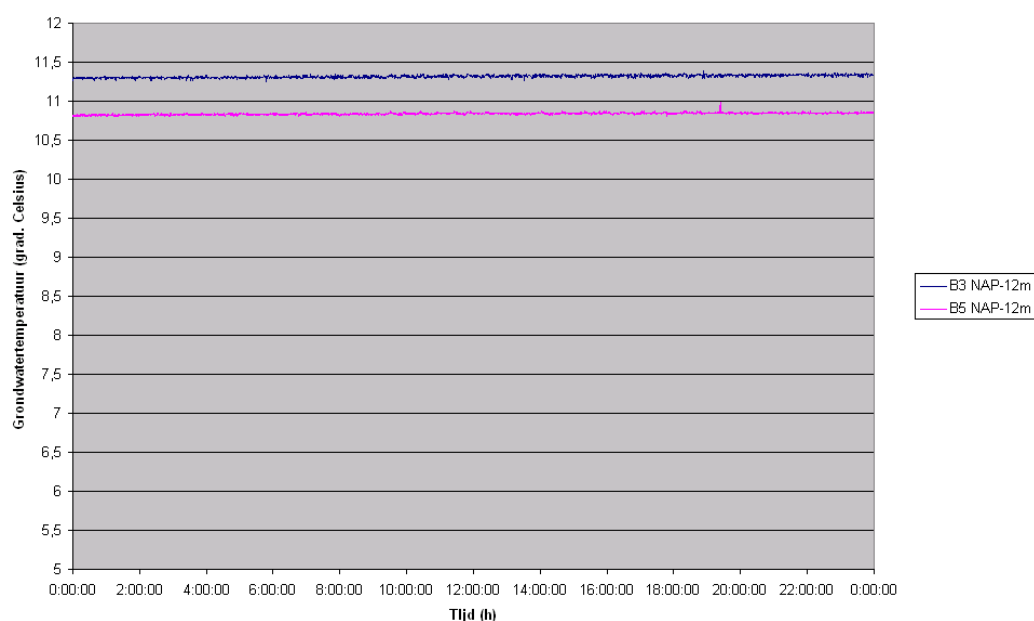
Figuur 9.8: verloop van de grondwaterstand in B3 tijdens het legen van de kolk

De stijghoogte tijdens het vullen (figuur 9.7) neemt toe met een snelheid van ca. 8cm/min en bereikt in 2 minuten het maximum. De afname volgt direct hierna en gaat

de eerste paar minuten met een snelheid van 3cm/min, waarna het tempo langzaam afneemt.

Tijdens het legen (figuur 9.8) daalt de stijghoogte met 14cm/min. Het minimum wordt evenals bij het vullen binnen 2 minuten bereikt. Het stijgen naar de uitgangswaarde gaat in het begin met 3cm/min, ook dit is vergelijkbaar met de situatie tijdens het vullen. De laatste 5 cm verloopt aanzienlijk trager. Ook dit is terug te zien bij het vullen. De grootte van het maximum en het minimum komt ook overeen. In beide gevallen ca. 15 cm.

De gedetailleerde analyse bevestigt het idee van wateroverspanning tijdens het vullen van de kolk en wateronderspanning tijdens het legen. Het effect van druktoename door de extra belasting is groter dan het wegstromen van het grondwater. Zoals eerder verondersteld komt dit door de aanwezigheid van overwegend fijn zand. Bij de aanwezigheid van klei zou de afname van de druk overigens nog veel langzamer zijn verlopen.



Figuur 9.9: grondwatertemperatuur in de peilbuizen 3 en 5 op 10 juli

Een laatste controle betreft het verloop van de grondwatertemperatuur. Bij een continue uitwisseling van warmer oppervlaktewater en grondwaters zou de temperatuur overdag (gedurende het schutten) enigszins moeten stijgen. Hier is niets van te merken. De fluctuatie over een gehele meetweek is niet meer dan 0,2°C.

Uit figuur 9.9 volgt tevens dat de temperatuur van het grondwater gemeten in buis B3 ca. 1° hoger is dan van het grondwater in B5. Bij bestudering van de meetwaarden van de andere buizen blijkt dat dicht bij het Markermeer (intreepunt van kwelwater) een hogere temperatuur gemeten wordt. Zo wordt in B1 een gemiddelde temperatuur van 13,5°C geregistreerd. Blijkbaar koelt de kwelstroom af als gevolg van vermenging met kouder grondwater.



## 9.4 Conclusie

Bij een verval van 5 meter heeft de Zuidersluis voldoende veiligheid tegen piping. De waterafdichtende werking van de bovenstroomse keileemlaag in combinatie met scherm A is buitengewoon goed. Achter scherm A is de grondwaterstand nog maar ongeveer 1 meter hoger dan polderpeil. De schermen C en D zorgen voor een daling van de grondwaterstand met respectievelijk 0,25m en 0,75m. Onder de kolkvloer en de sluishoofden is naar alle waarschijnlijkheid een spleet aanwezig. Er is hier een klein verhang, dat voor stroming zal zorgen.

Er is geen sprake van lekkage van de kolk en/of de sluishoofden. De kortdurende dalingen en stijgingen van de grondwaterstand met maximaal 15 centimeter worden veroorzaakt door het ‘stampen’ van de sluis en het stijfheidsgedrag van de ondergrond tijdens het vullen en ledigen. Dit effect neemt snel af naarmate de afstand tot de sluis toeneemt. Ook de diepte is bepalend. Boven het niveau van de onderkant van de kolkvloer (dus naast de kolkwanden) heeft het ‘stampen’ nauwelijks effect op de grondwaterstand. Ook uit de constante temperatuur van het grondwater blijkt dat er geen indicatie is voor transport van water als gevolg van lekkage van de sluis.

Als vooraf niets bekend was geweest over de aanwezigheid en de plaats van de kwelschermen had op basis van de meetgegevens dezelfde conclusie over de veiligheid getrokken kunnen worden. Derhalve blijkt dat het gekozen stramien voor de plaatsing van de peilbuizen voldoet.

Het maatgevende verval over de sluis is 5,85m. Dit betekent dat onder extreme omstandigheden het verval nog 0,85 meter groter kan worden. Zelfs al zou dit een verhoging zijn die 12 uur aanhoudt, is het effect op de grondwaterstand ter plaatse van het uittreepunt nog nihil en blijft de veiligheid gewaarborgd.

Het faseren van de meting en het pas later verfijnen is een effectieve methode. Pas nadat een globaal beeld is verkregen moet worden getracht het meetprogramma gericht te wijzigen zodat ook antwoorden op de resterende vragen gevonden kunnen worden.

## 9.5 Literatuur

- [1] Onderzoek lekkages Oost- en middenkolk sluis Maasbracht, Inpijn-Blokpoel 22 oktober 2004





## H10 Radar en tracer; uitkomsten en toepassing

### 10.1 Uitvoering

Op 11 mei 2005 is bij de Zuidersluis een meting uitgevoerd met radar en tracer technologie. Beide technieken zijn besproken in hoofdstuk 4. Radar is inmiddels een redelijk conventionele methode, tracer daarentegen is nog experimenteel. Een combinatie van beide technieken betekent slechts dat tegelijk met beide methoden wordt gemeten. Elke techniek heeft hierbij zijn eigen toepassingsgebied, zoals later zal blijken.

De meting komt neer op het voorttrekken van een meetkarretje langs de contouren van de sluis. Omdat bij deze meting geen gebruik wordt gemaakt van GPS voor de plaatsbepaling van het meetkarretje worden de afstand en de plaats ervan met een meetwiel bepaald, relatief ten opzichte van de sluis. Er wordt een denkbeeldig x,y-coördinatenstelsel ingevoerd waaraan de metingen later gekoppeld kunnen worden. Met het karretje is ca. 5 maal heen en weer gelopen aan beide zijden van de sluis. Ook is de apparatuur in een rubberboot tweemaal door de sluis kolk gesleept, een keer langs de oostzijde en een keer langs de westzijde. Pas tijdens het uitwerken (enkele weken na de meting) blijkt de meetreeks dermate veel ruis te bevatten dat er geen informatie uit kan worden verkregen. De meting is onbruikbaar. De ruis is waarschijnlijk afkomstig van communicatieapparatuur op het dak van gemaal De Blocq van Kuffeler. Bij de meting is hiermee onvoldoende rekening gehouden.



*Figuur 10.1: radar en tracer, apparatuur en gebruik*

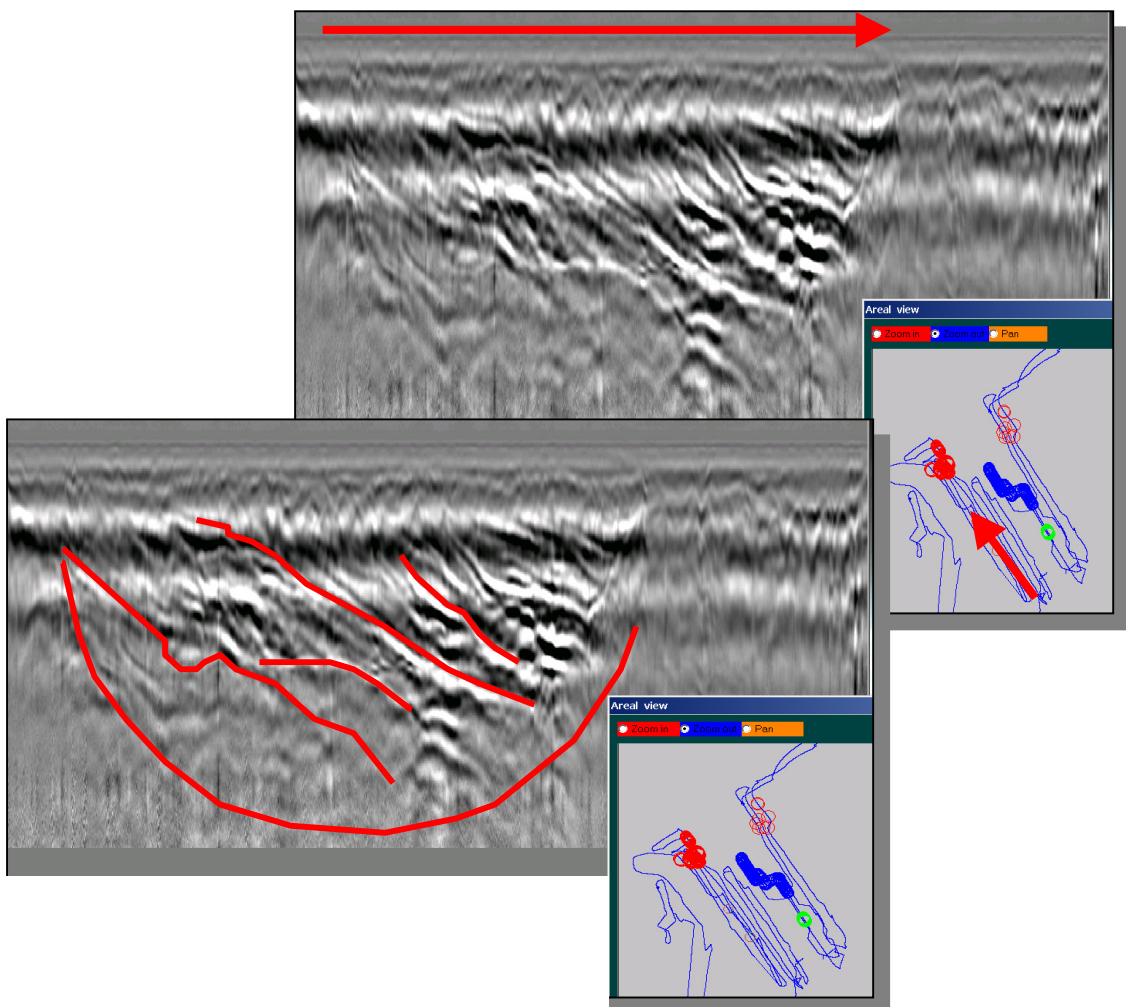
Op 21 juli wordt een nieuwe meting verricht. Deze keer met aangepaste instellingen. Een betere antenne en maatregelen om ruis te onderdrukken moeten uitkomst bieden. Bovendien wordt deze keer gebruik gemaakt van GPS als instrument voor plaats en afstandbepaling. Dit betekent dat alle meetgegevens direct gekoppeld zijn aan een coördinaat en niet telkens handmatig een plaatsbepaling nodig is. Op dezelfde manier als de eerste keer wordt het apparaat enkele keren langs de sluis heen en weer getrokken. Ook nu wordt gemeten met een combinatie van radar en tracer. De meting is binnen een uur voltooid. De uitwerking wordt nog diezelfde middag verricht, zodat direct over de informatie kan worden beschikt.

## 10.2 Uitwerking en resultaten

Uitwerking bij de methode radar en tracer is niets anders dan het inlezen van de data uit de meetapparatuur in specialistische software. Ook dit kost evenals de meting zelf niet veel moeite. De grootste moeilijkheid is de interpretatie van de gegevens. Radar en tracer hebben beide hun eigen uitvoer en worden apart beoordeeld.

Uit de bestudering van de radargegevens kan het volgende worden opgemaakt:

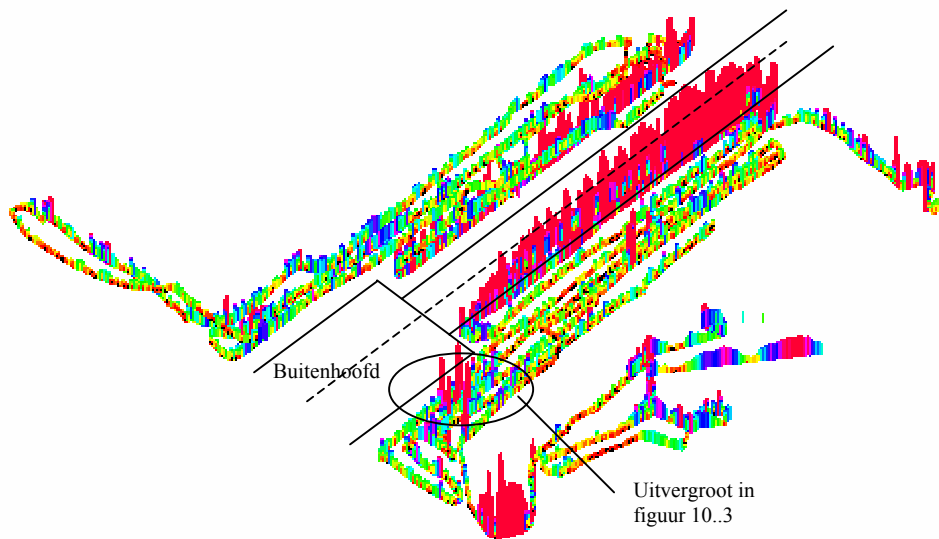
- Radar geeft een heel nauwkeurig beeld van de bodemopbouw, tot een beperkte diepte. In dit geval tot NAP-5m. Er is gebruik gemaakt van radargolven met een frequentie van 300MHz, bij een lagere frequentie kan tot grotere diepte worden gemeten. De meting wordt dan echter wel minder gevoelig.
- Zonder veel bewerkingen kan uit de radargegevens direct een nauwkeurig beeld van de bodemopbouw worden verkregen. Er is zelfs te zien dat de aanvulling naast de sluis in lagen is opgebracht. De resultaten zijn zo duidelijk dat het aantal lagen kan worden geteld (zie figuur 10.2).
- In de radargegevens is scherm B, ter plaatse van het buitenhoofd, duidelijk te herkennen. De breedte is met ca. 1 meter nauwkeurig vast te stellen, voor de bepaling van de lengte is een meting tot grotere diepte noodzakelijk. Wel is te zien dat tot de diepte van de meting (NAP-5m) scherm B aanwezig is. Scherm A is zonder radar reeds waar te nemen, ter plaatse van de schermen C en D is geen meting verricht.



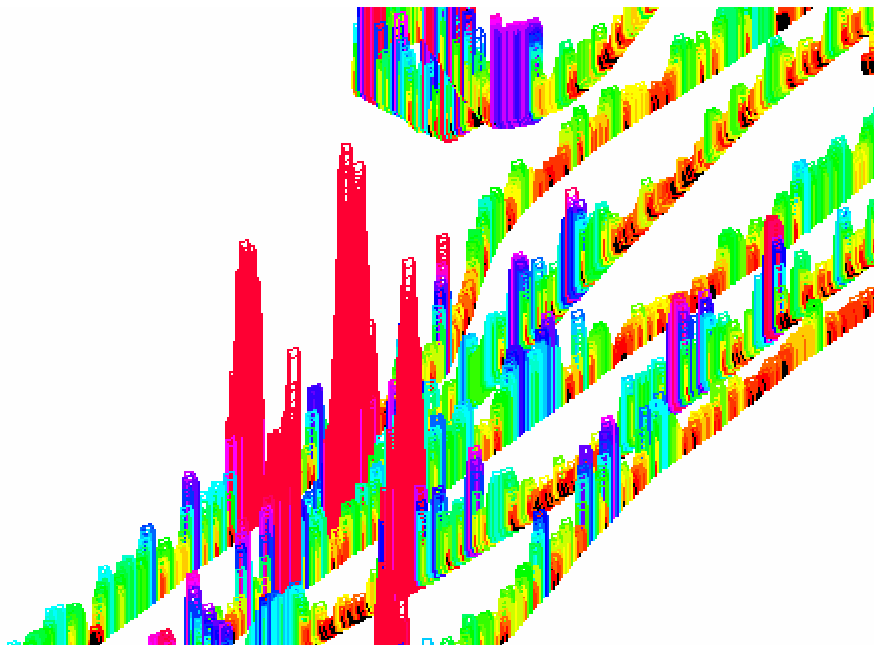
Figuur 10.2: radarprofielen, rechts is de meetlocatie aangegeven

Uit de bestudering van de tracergegevens blijkt het volgende:

- Tracer blijkt bij het onderzoek naar onder- en achterloopsheid vooral een hulpmiddel te zijn bij het aanwijzen van (ten opzichte van hun omgeving) afwijkende gebieden. De afwijking is voornamelijk gebaseerd op verhoogde grondwaterstroming en/of een overgang tussen verschillende materialen/grondlagen.
- De aandachtsgebieden bij de Zuidersluis zijn de gebieden vlak langs de sluiscolk en ter plaatse van scherm B, naast het buitenhoofd. In deze gebieden lijkt een, ten opzichte van de omgeving, grotere grondwaterstroming aanwezig te zijn. Zie de figuren 10.3 en 10.4.



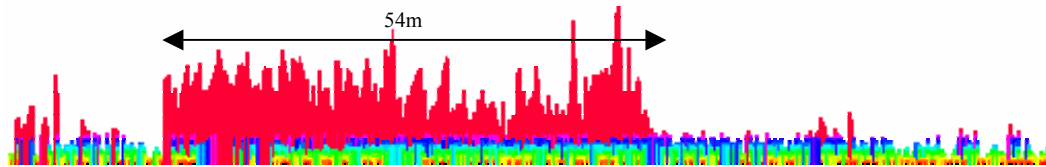
*Figuur 10.3: grafische uitvoer van tracerresultaten, ter verduidelijking zijn de contouren van de sluis erbij geschetst.*



*Figuur 10.4 uitvergroting traceruitvoer, westelijk van het buitenhoofd. De extreme waarden bevinden zich ter plaatse van scherm B en eindigen ca. 6 meter uit de kolkwand. Dit is ongeveer gelijk aan de breedte van het scherm.*

### 10.3 Mogelijke verklaringen

De gegevens van tracer geven een verhoogde grondwaterstroming langs de kolkwanden te zien, met een duidelijke toename in de richting van scherm C, onder het binnenhoofd. (zie figuur 10.5) Dit sluit zeer goed aan bij de conclusie uit het peilbuisonderzoek dat onder de kolk een spleet aanwezig is. Dan is immers ook een verhoogde stroming via deze spleet mogelijk. Ook rond scherm B, aan de oostkant van het buitenhoofd, is een verhoogde grondwaterstroming te zien. Dit is ongeveer ter hoogte van peilbuis B3. B3 geeft een hogere grondwaterstand aan dan B1 en dit zou kunnen duiden op stroming van B3 naar B1, hetgeen onmogelijk is.



*Figuur 10.5: aanzicht traceruitvoer in westelijke richting*

De verhoogde uitslag in de resultaten van tracer zou ook kunnen duiden op een verhoogde verzadigingsgraad van de bodem. Wellicht dat door het fijne zand een behoorlijke capillaire opstijging optreedt. Langs de kolk en ter hoogte van B3 is de uitslag dermate groot dat volgens Groundtracer een hoge verzadigingsgraad alleen niet de oorzaak kan zijn. Aan de westzijde van het buitenhoofd is ook een verhoogde potentiaal waarneembaar, echter wel minder extreem. Deze asymmetrie geldt ook voor de stroming onder/naast de kolk. Ook hier is de stroming westelijk daadwerkelijk groter en/of duidelijker waarneembaar.

Een andere verklaring voor de verhoogde intensiteit aan de zijkant van de kolk is de aanwezigheid van keileemlichamen langs de kolkwanden. Uit tekening ZZWXT000146, overzicht grondwerken en boringen blijkt naast de kolk keileem aangebracht te zijn vanaf de onderkant van de fundering tot NAP-1m. Aangezien klei meer vocht bevat dan zand zou dit de reden van de verhoogde uitslag kunnen zijn.

De verhoogde intensiteit blijkt uit figuur 10.5 over een afstand van 54 meter aanwezig te zijn, dit is de afstand vanaf het buitenhoofd tot de ophaalbrug over het binnenhoofd. Over deze afstand is ook keileem aanwezig. In hoofdstuk 8 is geconcludeerd dat ook onder de hoofden een spleet aanwezig is. Als dit daadwerkelijk het geval is, zou langs het buitenhoofd ook verhoogde intensiteit waargenomen moeten worden.

### 10.4 Toepassingspotentie

De radartechnologie blijkt in zandige bodem potentie te hebben bij de opsporing van kwelschermen. De plaats van een scherm is nauwkeurig te achterhalen (orde 50cm) en de breedte eveneens. De diepte is moeilijker te bepalen en hangt sterk af van de grondwaterstand. Als de te meten afstand onder water te groot wordt, moet de frequentie zover worden verkleind dat de meting erg onnauwkeurig wordt.

Er is geen ervaring opgedaan met het waarnemen van de getrapte vorm van een scherm. Het enige waargenomen scherm heeft slechts één niveau. Verwacht wordt dat door de ligging onder de grondwaterstand een getrapte vorm niet waargenomen kan worden.

De tracer technologie lijkt op het gebied van pipingcontrole niet bruikbaar te zijn. In combinatie met een stijghoogteonderzoek is het wel nuttig om bepaalde theorieën bevestigd te zien. De techniek op zich is te onduidelijk en laat veel dingen ongewis. Er kan geen duidelijke oorzaak aangewezen worden om de verhoogde potentiaalverschillen op bepaalde punten te verklaren. Het wordt immers nooit geheel duidelijk wat waargenomen wordt.







## Deel IV Toepassing en conclusies

<b>H11 Algemene toepassing peilbuisonderzoek.....</b>	<b>85</b>
11.1 Inleiding .....	85
11.2 Aantonen van kwelvoorzieningen.....	85
11.2.3 Filters .....	88
11.3 Stromingsanalyse .....	88
11.3.1 Onderloopsheid .....	89
11.3.2 Achterloopsheid .....	90
11.3.3 Combinatie van verticale en horizontale stroming .....	90
11.3.4 Heave .....	91
11.4 Lokaal versus globaal .....	91
11.5 Maatgevende omstandigheden versus meetomstandigheden.....	91
11.6 Drie-in-één criterium .....	91
11.7 Literatuur.....	92
<b>H12 Denkmodel beoordeling onder- en achterloopsheid .....</b>	<b>93</b>
<b>H13 Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>97</b>
13.1 Conclusie meetmethoden .....	97
13.2 Conclusies casestudy .....	97
13.3 Aanbevelingen .....	98





# H11 Algemene toepassing peilbuisonderzoek

## 11.1 Inleiding

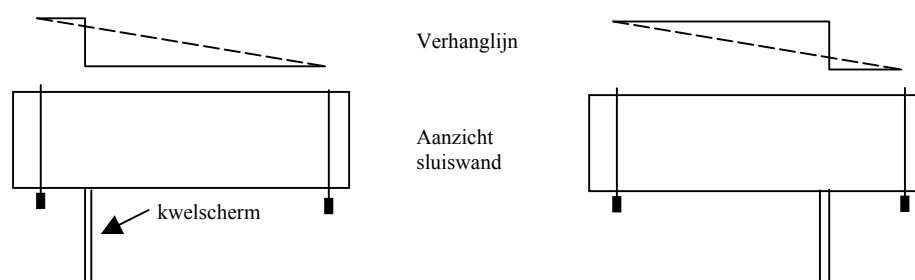
Het onderzoek bij de Zuidersluis te Almere mag dan succesvol geweest zijn, het betekent niet dat toepassing in alle gevallen een dergelijk positief resultaat zal leveren. Ook bij de Zuidersluis zijn enkele vragen onbeantwoord gebleven. Daar niet tijdens een storm (windopzet op het Markermeer) is gemeten en ook het polderpeil tijdens de gehele meetperiode constant was, zijn bijvoorbeeld geen resultaten verkregen van omstandigheden anders dan de normale. Wat de situatie is bij maatgevend verval kan alleen door extrapolatie worden geschat. In dit hoofdstuk wordt de meer algemene opzet van een peilbuisonderzoek bij een waterkerend kunstwerk behandeld. Waar in voorgaande hoofdstukken alleen over een sluis werd gesproken, wordt nu meer gericht op algemene toepasbaarheid. De opgedane ervaring en resultaten van de casestudy dienen wel als uitgangspunt. Hoewel elk kunstwerk in zekere zin zijn eigen aanpak vereist, zijn bepaalde aandachtspunten immers algemeen geldend. In hoofdstuk 12 wordt de hier gegeven opzet samengevat in een stappenplan.

## 11.2 Aantonen van kwelvoorzieningen

Uit de hoofdstukken 4 en 5 kan worden geconcludeerd dat peilbuisonderzoek en (grond)radar goede methoden zijn om kwelvoorzieningen te detecteren. Beide methoden zijn toepasbaar bij alle waterkerende kunstwerken.

Er wordt aangeraden de metingen gefaseerd uit te voeren. Hiermee wordt voorkomen dat vooraf teveel energie en geld wordt gestoken in richtingen van onderzoek die totaal niet relevant zijn. In dit opzicht is sprake van voortschrijdend inzicht. Eerst dient men met minimale middelen een onderzoek te verrichten naar de mechanismen die waarschijnlijk een rol zullen spelen, vervolgens dient het onderzoek te worden uitgebreid op basis van de nieuw verkregen informatie.

Peilbuisonderzoek is een goede methode omdat direct het effect van een scherm wordt waargenomen. Bij onderzoek naar piping is dit waardevoller dan alleen de kennis over de plaats van een scherm. Als tussen twee peilbuizen die op enige afstand van elkaar zijn aangebracht, parallel aan de richting van de grondwaterstroming langs het kunstwerk, een afname in verval bestaat kan dit veroorzaakt worden door een kwelscherm dat zich ergens tussen de peilbuizen bevindt. Waar dit scherm zich precies bevindt kan wel achterhaald worden (met radar of een dichter raster van buizen) maar dit is feitelijk niet nodig. Dat er ergens tussen de twee buizen een afname in verval is, is voor een controle op piping voldoende informatie (figuur 11.1).



Figuur 11.1: plaats kwelscherm en vorm van de verhanglijn

### 11.2.1 Kwelschermen

De kwelschermen worden ingedeeld naar materiaalsoort. Uit eerder onderzoek [1] is over de toepassing van kwelschermen door de jaren heen het volgende bekend:

Houten schermen:

- Houten schermen worden toegepast zolang als waterkerende kunstwerken worden gebouwd. Er werd gebruik gemaakt van de houtsoorten vuren en grenen. De planken hadden veelal een maximale lengte van 2,5 tot 3,5 meter.
- Naast een constructie hadden de schermen beperkte afmetingen, of waren ze geheel afwezig. In ieder geval reikten ze niet tot kerende hoogte.
- Pas halverwege de 19<sup>e</sup> eeuw werd tropisch hardhout gebruikt als materiaal voor kwelschermen. Deze houtsoort is beter bestand tegen paalworm (anaërobe aantasting), en mede daardoor veel duurzamer dan vuren en grenen.
- Als verduurzaming werd hout vaak geïmpregneerd, bijvoorbeeld met creosootolie.
- Bij houten schermen onder water is paalworm het enige mechanisme dat voor aantasting kan zorgen. Het proces verloopt traag (volledig doorrotten in 50 tot 100 jaar), maar levert langzaamaan toch functieverlies op.
- Slechts in mariene milieus is er nog een ander mechanisme dat houten schermen aantast; mariene boorders. Hieronder vallen kreeftachtigen met de gribbel als belangrijkste soort en wormachtigen zoals de paalworm. Volledige afbraak van houten planken is mogelijk in ca. 10 jaar. De beestjes zijn alleen actief op de scheiding tussen water en bodem.

Stalen schermen [2 t/m 7],:

- Stalen schermen worden toegepast vanaf ca. 1900.
- De duurzaamheid hangt bij stalen schermen af van de dikte en de mate van bescherming van de gebruikte schermen evenals van het milieu waarin ze staan (chemische en biologische aantasting).
- Als eerste indicatie kan gebruikt worden dat de corrosie in mm per jaar bij onbeschermde stalen damwand voor zoet water 0,05mm en voor zout water 0,2mm per jaar per zijde zal bedragen.
- Voor een uitgebreide beschrijving van corrosie en waarden voor corrosiesnelheid wordt verwezen naar Euronorm EN 1993-5:2002 stage 34 [3]

Betonnen schermen:

- Deze worden toegepast vanaf het einde van de 19<sup>e</sup> eeuw
- Voor de beoordeling van de duurzaamheid is de dekkingsgraad de maatgevende parameter. Samen met het milieu waarin de schermen staan is dit bepalend voor de levensduur. Opgemerkt wordt dat aan een betonnen wand als zuivere kwelvoorziening geen draagkracht ontleend hoeft te worden en aantasting van de wapening alleen kwalijk is vanwege het afbrokkelen van de wand.

Met radar zijn zowel stalen, houten als betonnen schermen aan te tonen, ook als ze volledig onder de grond zitten. De keuze tussen oppervlakteradar en boorgatradar hangt af van de informatie die benodigd is. Voor alleen de plaatsbepaling van schermen is oppervlakteradar voldoende. Is ook informatie over de aanlegdiepte van de schermen nodig, dan is gebruik van een boorgatradar nodig. Nadelen van de



toepassing van radar zijn behandeld in hoofdstuk 4. In de casestudy werd ervaren dat snel vergissing mogelijk is over wat wordt waargenomen. Een damwandanker wordt bijvoorbeeld snel verward met een kwelscherm. Dit probleem bestaat bij een boorgatradar veel minder.

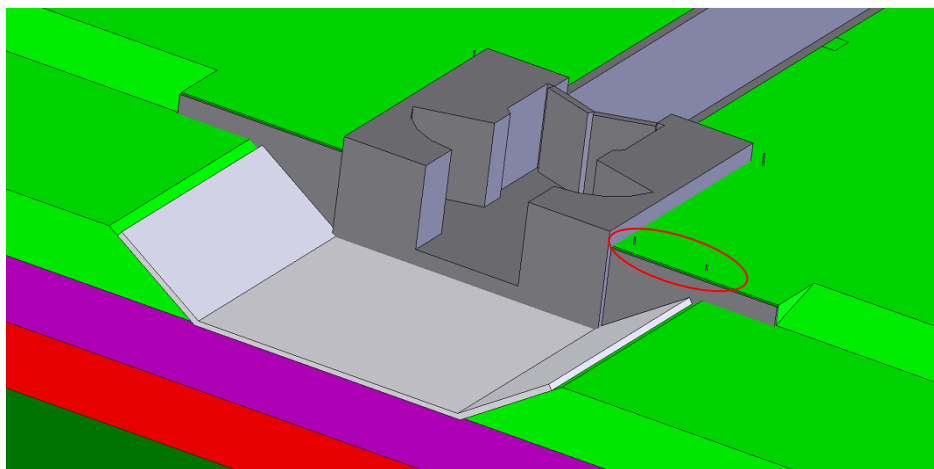
De grondsoort en het grondwaterniveau bepalen de frequentie van de radar die gebruikt moet worden. Hiermee ligt de nauwkeurigheid van de methode ook direct vast. Metingen tot onder de grondwaterstand zijn wel mogelijk, maar onnauwkeurig. Boorgatradar is in dit opzicht nauwkeuriger, het apparaat bevindt zich immers dichterbij het te onderzoeken object.

Uit de casestudy is gebleken dat peilbuisonderzoek uitstekend geschikt is voor de bepaling van de aanwezigheid van schermen. Het effect van een goed werkend scherm is, bij een juiste plaatsing van de peilbuizen (paragraaf 11.3), terug te vinden als een sprong in de verhanglijn. De exacte plaats en diepte zijn met de methode niet efficiënt te achterhalen.

### 11.2.2 Horizontaal afdichtende lagen

Bij de toetsing van de Zuidersluis leidde onbekend blijven van de horizontaal afdichtende keilemlagen in het eerste toetsrapport tot het oordeel onvoldoende op het onderdeel piping. In de tweede toetsronde werden de lagen op oude bestekstekeningen wel teruggevonden, maar daadwerkelijke aanwezigheid en werking (na 40 jaar) werden niet gecontroleerd. Bij aanvang van de casestudy bestond vooraf dus onduidelijkheid over het functioneren van zowel de bovenstroomse als benedenstroomse keilemlaag. Na peilbuisonderzoek kon de (grote) invloed van de bovenstroomse laag duidelijk uit de verhanglijn worden afgeleid.

Ook in het algemeen kan bij plaatsing van peilbuizen benedenstrooms van een afdichtende laag de werking van de laag worden beoordeeld. Eventueel kunnen in een volgende fase enkele buizen worden bijgeplaatst om een beeld te krijgen over heel de breedte van de laag. Omdat in een dergelijk geval de horizontale doorlatendheid groter zal zijn dan de verticale is de stijghoogte over de breedte waarschijnlijk redelijk constant.



*Figuur 11.2: plaatsing buizen aan landzijde van het buitenhoofd van een sluis.*

Uit een vergelijking tussen een buis met filter onder de laag en boven de laag kan eventueel de gradiënt over een laag worden bepaald. Verstandiger is het om een perforatie van een afdichtende laag te voorkomen en hiermee rekening te houden bij het plaatsen van de buizen. Dit houdt meestal in dat de buizen aan de landzijde van het kunstwerk geplaatst moeten worden (figuur 11.2).

Hoewel hier geen ervaring mee is opgedaan, is het in principe mogelijk een afdichtende laag met radartechnologie te onderscheiden van zijn omgeving. De dikte van de laag is hiermee grofweg te bepalen. Ook hier geldt echter de opmerking uit paragraaf 11.2, het waarnemen van het effect van de lagen is al voldoende, verdere informatie is eigenlijk niet nodig. Een boring of sondering kan verder uitsluitel geven, maar betekent ook dat een perforatie van de laag nodig is. Zoals gezegd dient dit te worden vermeden. Alleen voor de bepaling van de veiligheid van de benedenstroomse laag tegen opbarsten is het nodig de dikte van deze laag te kennen.

### 11.2.3 Filters

Bij waterkerende kunstwerken is aan de binnenzijde soms een filterconstructie aangebracht die moet voorkomen dat bodemdeeltjes onder de filterlaag wegspoelen. Dit betekent dat stroming onder een constructie en door het filter geen gevaar oplevert zolang de bodemdeeltjes maar worden tegengehouden. Een dergelijk filter is met peilbuizen niet aan te tonen, omdat bij een goede werking als kwelvoorziening geen gradiënt over het filter aanwezig is. Inspectie is slechts mogelijk met duikers of onderwatercamera's. Een goede inspectie op verstopping of uitspoelen van materiaal is moeilijk. Welvorming onder water is bijna niet vast te stellen door stroming in het water, bijvoorbeeld door schutten of spuien. Als gevolg hiervan spoelt meegevoerd zand direct weer weg. Aanbevolen wordt een eerste toets uit te voeren zonder het effect van het filter mee te nemen. Pas als blijkt dat het filter noodzakelijk is als kwelvoorziening kan geïnvesteerd worden in nader onderzoek.

### 11.3 Stromingsanalyse

Een weloverwogen plaatsing van de peilbuizen in de casestudy was mogelijk door goede kennis van de geometrie en de bodemopbouw rond het kunstwerk. Ook in een algemeen geval geldt dat deze kennis onmisbaar is en bepalend voor het goed slagen van een onderzoek. Voordat tot plaatsing van peilbuizen wordt overgegaan moet minimaal aan de volgende eisen zijn voldaan:

- De geometrie van het te onderzoeken kunstwerk ligt eenduidig vast.
- De bodemopbouw is in grote lijnen bekend, met name de plaats en dikte van klei- en veenlagen zijn hierbij belangrijk.
- De funderingswijze is bekend.

Betreffende de geometrie wordt opgemerkt dat de afmetingen van de constructie en het aanlegniveau voldoende informatie zijn. Als gegevens over schermen en/of horizontaal afdichtende lagen bekend zijn, dient hier bij het opstellen van een meetplan uiteraard rekening mee te worden gehouden.

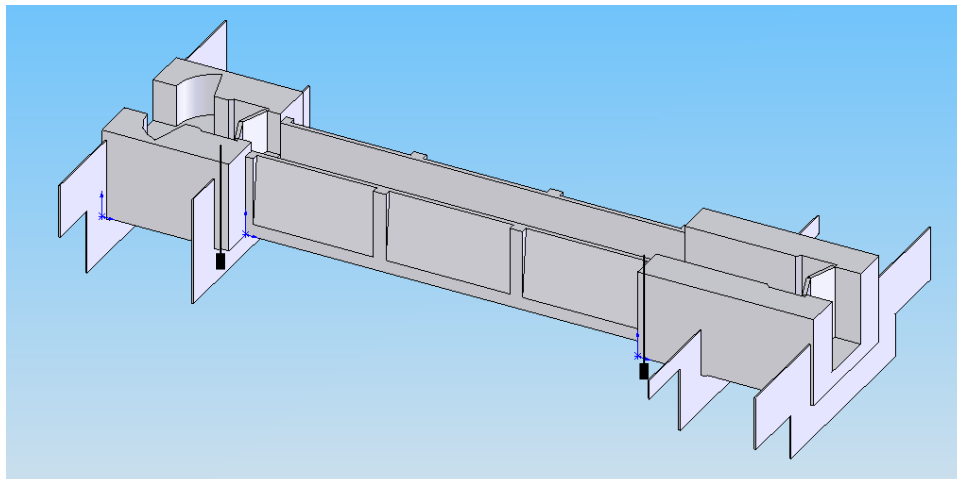
Voor het snel beoordelen van een constructie op basis van enkel een verhanglijn zijn slechts twee meetfilters en kennis over de binnen- en buitenwaterstand noodzakelijk. Peilbuis 1 moet aangebracht worden op enkele meters benedenstrooms van de intreezijde, buis 2 komt enkele meters bovenstrooms van de uittreezijde. Omdat stroming rond kunstwerken ook daadwerkelijk dicht naast of onder het kunstwerk



verloopt moeten de meetfilters zo dicht mogelijk naast de constructie worden aangebracht, op ca. 1 meter onder het aanlegniveau. Zelfs zonder kennis van de kwelvoorzieningen komt bij plaatsing volgens deze wijze informatie beschikbaar over het verhang aan de intreezijde, het verhang over het grootste deel van de constructie (tussen de beide buizen) en het verhang aan de uittreezijde. Dit betreft een maximaal verhang dat bij aanwezigheid van kwelschermen alleen maar kleiner is. Waar eventuele kwelschermen zijn geplaatst kan niet worden vastgesteld, maar is voor een snelle controle ook niet relevant. Op basis van de grootte van het uittreeverhang kan vervolgens met behulp van het heave-criterium een kwantitatief oordeel over de veiligheid van het kunstwerk met betrekking tot piping worden gegeven.

### 11.3.1 Onderloopsheid

Onderloopsheid kan zoals gezegd het beste dicht bij het kunstwerk worden onderzocht. Als wordt vermoed dat de kortste route op bepaalde plaatsen onder schermen doorgaat moeten direct achter een scherm peilbuizen worden geplaatst met filters op verschillend niveau. Op de betreffende plaats kan hiermee beoordeeld worden of stroming vanuit diepe lagen naar ondiepere lagen optreedt, of dat de stroming juist andersom gericht is (zie figuur 11.4).



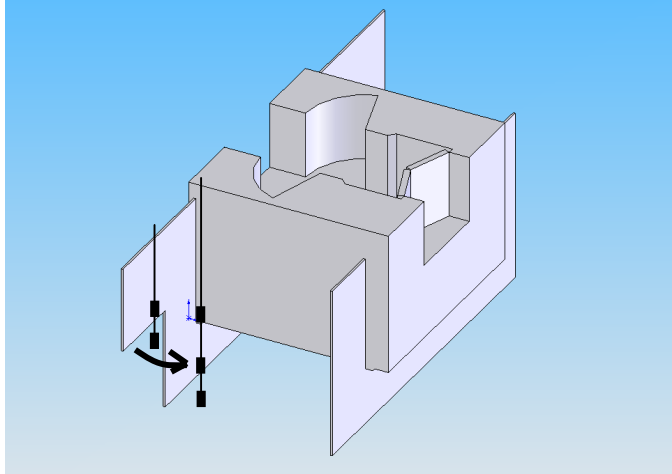
*Figuur 11.3: meetfilters om het verhang over de sluiskolk te bepalen*

In de casestudy zijn bij een fundering op palen goede resultaten behaald met peilbuizen direct naast de constructie, met een filterniveau ca. 1 meter onder het funderingsniveau. Dit kan worden aanbevolen voor zowel een fundering op staal als op een fundering op palen. De meetfilters dienen zo dicht mogelijk naast het kunstwerk aangebracht te worden (zie figuur 11.3). Uiteraard dient hierbij rekening gehouden te worden met kabels en leiding die meestal ook dicht naast het kunstwerk liggen.

Bij een fundering op staal, mag een goede aansluiting tussen bodem en kunstwerk worden verwacht, hetgeen moet blijken uit de afname in de stijghoogte tussen een bovenstroomse en benedenstroomse peilbuis. Bij een fundering op palen zal het verhang tussen de buizen nagenoeg nul zijn, als gevolg van de spleet tussen constructie en bodem.

### 11.3.2 Achterloopsheid

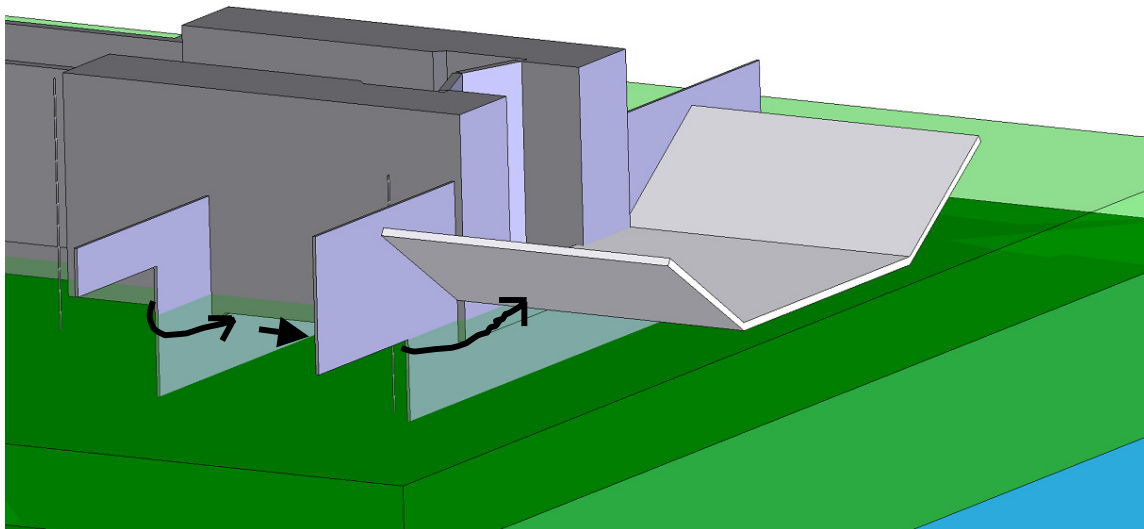
Achterloopsheid en dan met name stroming horizontaal om schermen heen, kan in de omgeving van de schermen worden onderzocht met meetfilters voor of achter een scherm. De meetfilters moeten hierbij op enige afstand uit elkaar worden geplaatst, op dezelfde diepte (zie figuur 11.4).



*Figuur 11.4: stroming rond getrappt kwelscherm, plaatsing peilbuizen voor een zo goed mogelijke registratie van de stroming achter het scherm.*

### 11.3.3 Combinatie van verticale en horizontale stroming

Feitelijk is in de meeste gevallen bij kunstwerken sprake van een combinatie van stroming. Een goed voorbeeld is stroming rond een getrappt kwelscherm. De kortste route hier is (afhankelijk van de grondslag en de afmetingen van het scherm) stroming langs het diepe deel van het scherm en onder het ondiepe deel door. Een combinatie dus van verticale en horizontale stroming. Bij een getrappt scherm is het aan te bevelen een peilbuis te plaatsen met het filter ter plaatse van de trap in het scherm (ca. 1 meter onder het korte deel). In combinatie met een meetfilter, op dezelfde diepte, maar dichterbij het kunstwerk kan de richting van de stroming globaal worden afgeleid (zie figuur 11.4).



*Figuur 11.5: achterloopsheid, uittreden van grondwater via het talud*



### **11.3.4 Heave**

In veel situaties bij kunstwerken zal sprake zijn van heave. Nagenoeg alle kunstwerken liggen op funderingsniveau ingebed in een grondlichaam, waardoor het uittreeverhang verticaal is. Alleen bij achterloopsheid aan de benedenstroomse zijde is uittreden via een talud mogelijk (zie figuur 11.5). In dit geval lijkt de situatie op piping bij dijken. Heave kan eenvoudig worden getoetst als het uittreeverhang bekend is. In theorie is dit lastig te bepalen, in de praktijk niet. Door plaatsing van peilbuizen op de meest aannemelijke uittreeplaatsen kan een inschatting van het maatgevende verhang worden gemaakt. Feitelijk kan, zoals gezegd, alleen al op basis van deze meting een conclusie worden getrokken over de veiligheid tegen piping. Essentieel is natuurlijk wel de grootte van het verval dat tijdens de meting over de constructie stond (zie paragraaf 11.5).

### **11.4 Lokaal versus globaal**

Een probleem van peilbuisonderzoek is dat slechts een lokale grondwaterstand wordt verkregen. Met name bij een heterogene grondslag bestaat het gevaar dat stroming toch geconcentreerd is via een meer of minder doorlatende laag dan waar het filter van de peilbuis in is aangebracht. Op basis van het grondonderzoek moet hier een oordeel over worden gegeven.

### **11.5 Maatgevende omstandigheden versus meetomstandigheden**

Als het enigszins mogelijk is kan er het beste voor worden gekozen de metingen in een periode te plannen waarin de kans groot is dat extreme belastingsituaties zullen optreden. In dit geval kan direct beoordeeld worden hoe de kwel rond het kunstwerk hiermee verandert ten opzichte van de normale omstandigheden en is er direct uitsluitsel over de veiligheid op het gebied van piping. Tijdsafhankelijkheid speelt hierbij een grote rol. Er is (theoretisch) onderzocht dat de verhouding tussen doorlatendheid van de bodem en de periode van de golf (buitenwaterstandverhoging) hierbij maatgevend is. In de casestudy bleek onder de heersende omstandigheden de invloed van waterstandverhogingen zeer beperkt.

Als niet tijdens extreme omstandigheden gemeten kan worden moet middels een extrapolatie inzicht in de veiligheid tegen piping worden verkregen. Feitelijk is hierbij alleen het verhang aan de benedenstroomse zijde van het kunstwerk maatgevend. Hier zal piping immers beginnen, als de weerstand onvoldoende is. De uiteindelijk verdeling van de extra belasting over de verschillende kwelvoorzieningen is dus niet relevant. In het algemeen is met behulp van het heave-criterium aan te tonen dat ook bij maatgevend hoogwater het uittreeverhang niet kritiek wordt.

Horizontaal afdichtende lagen dienen ook getoetst te worden op opbarsten onder maatgevende omstandigheden.

### **11.6 Drie-in-één criterium**

In de onderzoeksfase voorafgaand aan de casestudy is een inventarisatie gemaakt van te onderzoeken kunstwerken in Nederland. Met als uitgangspunt de VNK-database met waterkerende kunstwerken in primaire waterkeringen [8] is gezocht naar kunstwerken met het oordeel onvoldoende op het onderdeel piping. Als criterium hierbij is gehanteerd; korte kunstwerken met een groot verval op zandige bodem zijn het meest pipinggevoelig. Dit drie-in-één criterium is algemeen geldend. Als hieraan wordt voldaan is niet alleen de kans groot dat sprake is van een kunstwerk dat



onvoldoende of twijfelachtig scoort op piping, maar is bovendien de onderzoeksmethode peilbuizen een geïjkt middel om de veiligheid tegen piping te beoordelen. M.a.w bij kunstwerken waar na een eerste theoretische toetsing extra onderzoek nodig is, loont het de moeite praktisch onderzoek te verrichten.

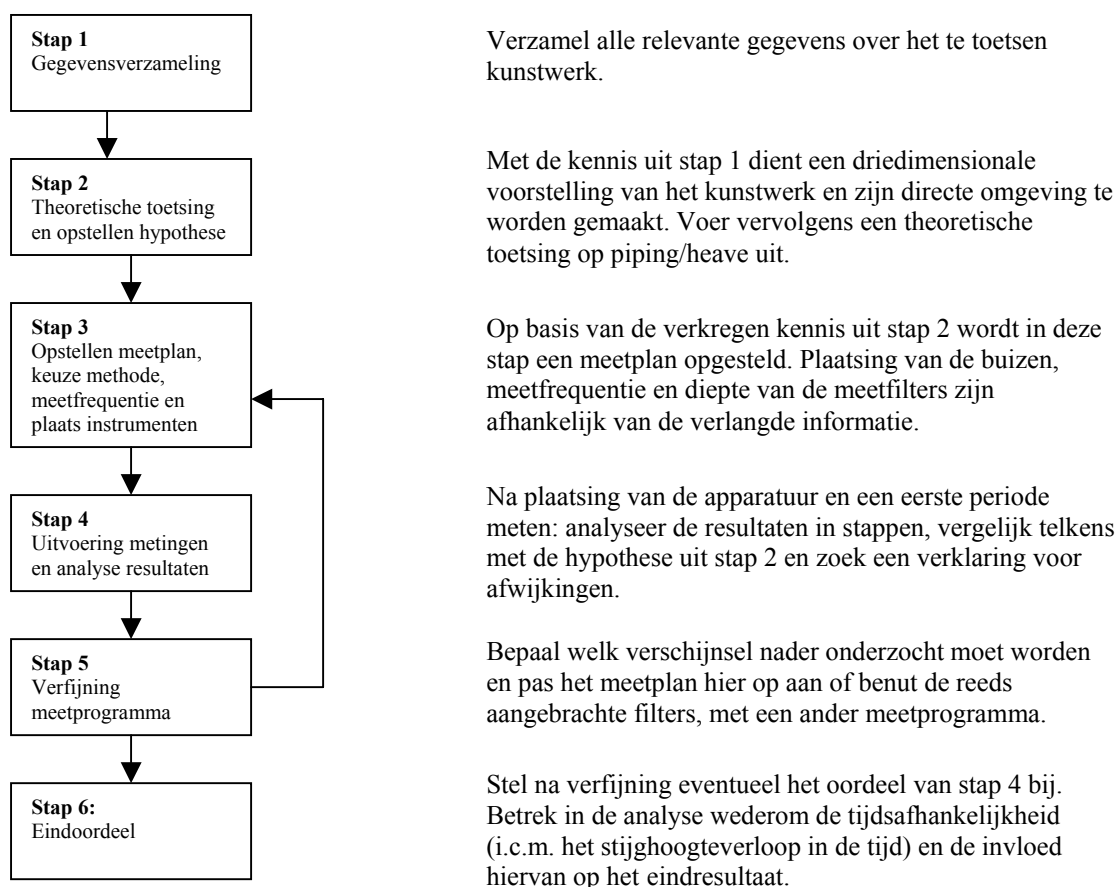
### 11.7 Literatuur

- [1] Stichting toegepast onderzoek waterbeheer, waterkeringsonderzoek historische kunstwerken, DHV 2004
- [2] Historische sluisen en stuwen, G.J. Arends
- [3] Euronorm EN 1993-5:2002 stage 34
- [4] Handboek kademuren (op basis van EAU en BS)
- [5] Arbed damwand fabrikant
- [6] EAU 1996
- [7] Corus construction centre, pilinghandboek
- [8] Project de Veiligheid van Nederland in Kaart (VNK), gestart in 2001. Database met toetsingsrapporten.



## H12 Denkmodel beoordeling onder- en achterloopsheid

Dit hoofdstuk geeft de in de casestudy gevolgde methode in de vorm van een stappenplan weer. Hiermee wordt beoogd een handvat te geven voor toekomstige praktische toetsingen op piping middels het gebruik van peilbuizen/waterspanningsmeters. Voor illustraties en uitleg wordt verwezen naar hoofdstuk 11.



### 12.1: Stappenplan beoordeling op onder- en achterloopsheid

#### Stap 1: gegevensverzameling

Verzamel alle relevante gegevens over het te toetsen kunstwerk. Voor een goed meetprogramma moet minimaal beschikbaar zijn:

- Informatie over de geometrie van het kunstwerk
- De bodemopbouw ter plaatse van het kunstwerk
- Kennis over de toegepaste funderingswijze

Probeer ook te achterhalen:

- De bouwwijze, deze geeft extra informatie over de bodemopbouw direct naast het kunstwerk
- Plaats, aantal, lengte en configuratie van eventueel aanwezige kwelschermen
- Locatie, soort en afmetingen van eventueel aanwezige horizontale kwelvoorzieningen, zoals filters en afdichtende lagen



Soms is bovenstaande kennis al uit eerdere toetsingen beschikbaar, ook wordt hier vaak verwezen naar de oorspronkelijke bronnen/tekeningen, die vervolgens opgespoord en geraadpleegd kunnen worden.

### **Stap 2: theoretische toetsing en hypothese**

Met de kennis uit stap 1 dient een driedimensionale voorstelling van het kunstwerk en zijn directe omgeving te worden gemaakt. Bepaal aan de hand van dit model:

- Alle mogelijke, relevante kwelwegen.
- De volgens de theorie maatgevende kwelweg.
- Het volgens de theorie maatgevende faalmechanisme (piping of heave) en de plaats van de uittreepunten.

Stel aan de hand van de maatgevende kwelweg een hypothese op over de stroming rond/onder de constructie. Bereken op basis hiervan de theoretische, lineair verlopende, verhanglijn over de lengte-as van het kunstwerk.

- Houd bij de richting van de stroming onder/naast het kunstwerk rekening met de algehele richting van de grondwaterstroming in het gebied.
- Betrek in de hypothese de invloed van tijdsafhankelijkheid op de grootte van het uittreeverhang. Beoordeel aan de hand van doorlatendheden en golfperioden een eventueel negatief of positief effect op de veiligheid tegen piping.

### **Stap 3: meetplan opstellen**

Tenzij uit stap 2 anders is gebleken behoeft bij het bepalen van de plaats van de peilbuizen niet specifiek rekening gehouden te worden met de funderingswijze.

Meetmethode:

- Maak een keuze tussen waterspanningsmeters en peilbuizen, afhankelijk van de bodemgesteldheid en de verwachte invloed van tijdsafhankelijkheid.

Plaatsbepaling meetfilters:

- Plaats minimaal twee meetfilters, één ca. 2m benedenstrooms van de intreezijde en één ca. 2m bovenstrooms van de uittreezijde. Plaats beide buizen zo dicht mogelijk naast het kunstwerk, met een bovenkant filter op ca. 1m onder het aanlegniveau van het kunstwerk.

Methode van uitlezen en te gebruiken meetfrequentie:

- Elektronische meting is aan te bevelen, eventueel handmatig meten ter controle. De meetfrequentie wordt bepaald door het doel van de meting. Voor een eerste controle en het opstellen van een verhanglijn is een week meten met een frequentie van bijvoorbeeld 4 metingen per uur voldoende. Bij registratie van tijdsinvloeden dient een hogere frequentie toegepast te worden, afhankelijk van de mogelijkheden van de apparatuur bijvoorbeeld 240 metingen per uur.
- Bedenk dat peilbuizen beperkt zijn qua responsnelheid, voor een nauwkeurige meting van tijdseffecten moet overgestapt worden op het gebruik van waterspanningsmeters. De responsnelheid hangt o.a. af van de diameter van de gebruikte buis en de doorlatendheid en verzadigingsgraad van de grond rond het filter.



Afhankelijk van stap 2 en de verlangde informatie kan reeds in deze fase of na de eerste meetperiode (stap 5) gekozen worden voor extra buizen:

- Plaats eventuele extra meetfilters in dezelfde lijn als 1 en 2. Doe dit enkele meters benedenstrooms van een plaats waar een kwelscherm wordt verwacht of een overgang van constructieonderdelen is (bijv. aansluiting sluishoofd op schutkolk). Bij een afwijkende aanlegdiepte van de onderdelen kan gekozen worden voor twee filterniveaus per meetpunt, één op dezelfde diepte als de buizen 1 en 2, en één ca. 1 meter onder aanlegniveau, dus in het invloedsgebied van de fundering,
- Als de lengte van een scherm bekend is kan een filter met de bovenzijde ongeveer ter plaatse van de onderzijde van het scherm aangebracht worden, benedenstrooms van het scherm. In combinatie met een filter op dezelfde locatie, maar ondieper aangebracht, kan ook de richting van verticale stroming achter het scherm gedetecteerd worden.
- Als de configuratie van een scherm bekend is en informatie over stroming rond het scherm benodigd is kan een extra filter aangebracht worden;
  - ter plaatse van het uiteinde van een scherm (bij een ongetrapt scherm)
  - ter plaatse van de trap in het scherm (bij een getrapt scherm)Filters dienen op tenminste twee niveaus aangebracht te worden om stroming in verticale richting te detecteren.
- Een controle op symmetrie in het stromingspatroon onder/langs het kunstwerk kan gebeuren met een enkel filter op dezelfde diepte en in hetzelfde stramien als één van de anderen, maar dan aan de andere zijde van het kunstwerk, op dezelfde afstand loodrecht uit de as van de constructie.

#### **Stap 4: uitvoering metingen en analyse resultaten**

Na plaatsing van de apparatuur en een eerste periode meten kunnen de resultaten worden geanalyseerd. Analyseer in stappen, vergelijk telkens met de hypothese uit stap 2 en zoek een verklaring voor de afwijkingen:

- Stel eerst, met de stijghoogten uit de buizen met gelijke filterdiepte, geplaatst in ongeveer één lijn evenwijdig aan de as van het kunstwerk, een verhanglijn op voor het verloop van de stijghoogte evenwijdig aan de lengte-as van het kunstwerk. Vergelijk het verloop met de hypothese en verklaar de verschillen.
- Bepaal uit een vergelijking tussen de binnen- en buitenwaterstand en de gemeten stijghoogten, respectievelijk het uittree- en intreeverhang.
- Bepaal de veiligheid tegen het mechanisme heave of piping onder meetomstandigheden.
- Bepaal middels de buizen die benedenstrooms van een (vermoedelijk) scherm geplaatst zijn de werking van het scherm en de relatieve bijdrage van de schermen aan de afname van het verval over de lengte van het kunstwerk.
- Controleer het effect van de funderingswijze. Een verhang dat nagenoeg nul is duidt op een spleet onder de constructie en derhalve een fundering op palen. Bij fundering op staal mag dit niet het geval zijn.

Bepaal of met voldoende zekerheid een conclusie kan worden getrokken betreffende de veiligheid van het kunstwerk tegen piping/heave onder toetsomstandigheden. Ga in dit geval verder met stap 6. Is er nog onduidelijkheid en kan met de nu beschikbare



gegevens geen (betrouwbaar) oordeel worden gegeven dient stap 5 doorlopen te worden.

### **Stap 5: verfijning meetprogramma**

Maak gebruik van de extra mogelijkheden genoemd onder stap 3 en/of pas het meetprogramma naar eigen inzicht aan. Bepaal welk(e) verschijnsel(en) nader onderzocht moet(en) worden en pas het meetplan hier op aan (=bijplaatsen meetfilters) of benut de reeds aangebrachte filters op een van de volgende manieren:

- 1) Aanpassen van de meetfrequentie. Bij peilbuizen is vanwege de benodigde toestroom van grondwater de responsnelheid beperkt. De gemeten fluctuatie is derhalve een ondergrens voor de stijghoogte.
- 2) Aanpassen van de meetomstandigheden. Bijvoorbeeld door:
  - Tijdelijk en gecontroleerd wijzigen van het schutregime bij een schutsluis (een dag of nacht meten met volle of lege kolk, als controle op lekkage)
  - Kunstmatig aanpassen van het verval, bijvoorbeeld door wijzigen van het peil in een kanaalpand.
  - Meten tijdens extreme omstandigheden
  - Uitvoeren van een pompproef

### **Stap 6: eindoordeel veiligheid onder toetsomstandigheden**

Geef een eindoordeel over de veiligheid tegen piping/heave bij het kunstwerk. Indien de meetomstandigheden niet overeen kwamen met de toetsomstandigheden moet eerst geëxtrapoleerd worden.

Beoordeel vervolgens kwantitatief het uittreeverhang met de heaveregel of de methode van Lane. Als voor de meting boringen zijn uitgevoerd kan de kennis over de bodemopbouw hierbij worden gebruikt.

Betrek in het eindoordeel de werking van de kwelvoorzieningen (zowel horizontaal als verticaal) en hun relatieve effect, de invloed van de bodemopbouw en tijdsafhankelijkheid.



## H13 Conclusies en aanbevelingen

### 13.1 Conclusie meetmethoden

Het onderzoek naar de meetmethoden die toepasbaar zijn bij de pipingproblematiek wordt samengevat in tabel 13.1.

Meetmethode	Toepasbaarheid	Redenen
ECR/EFT	slecht	Plaatsing apparatuur is lastig en tijdrovend Slecht toepasbaar in cohesieve lagen De methode is kostbaar
Peilbuizen	goed	Geeft snel informatie over het verhang tussen de meetpunten Stromingspatroon kan uit resultaten worden afgeleid Relatief snel en goedkoop Kan als monitoringsinstrument blijven dienen
Waterspanningsmeters	goed	Idem als peilbuizen Ook snelle stijghoogteveranderingen waarneembaar Ook toepasbaar in cohesieve lagen
Radar - oppervlakteradar - tomografie - boorgatradar - oppervlakte tot boorgat meting	matig	Alleen in zand goede resultaten, in klei en veen al snel niet meer toepasbaar Waarnemingen beneden grondwaterpeil zeer onnauwkeurig Onzekerheid over wat waargenomen wordt Niet toepasbaar in brak en zout grondwater Alleen grondradar is een alternatief voor de magnetometer bij lengtebepaling van houten schermen
Tracer	slecht	Resultaten zijn onnauwkeurig en kwalitatief De oorzaak van het gemeten stromingspatroon wordt niet duidelijk
Seismiek	slecht	Een voor dit doeleinde te grove methode
Betontester	slecht	Schermen zijn niet/slecht bereikbaar voor toepassing van deze methode Tweedimensionale reflectie in schermen verstoort het signaal, de invloed hiervan is onbekend
Camerasonde	slecht	Zeer beperkt meetbereik Slechte bereikbaarheid van de schermen Omslachtige methode, slechts voor controle op detailniveau
Thermische meetmethoden	matig	Grondwatertemperatuur is natuurlijke tracer Toepasbaar i.c.m andere techniek, bijv. peilbuizen Als methode op zich omslachtig, duur en onvoldoende nauwkeurig
Magnetometer	matig	Alleen voor lengtebepaling van stalen en gewapend betonnen schermen, niet toepasbaar bij hout Levert slechts informatie over de lengte van schermen als de globale plaats bekend is

Tabel 13.1: samenvatting onderzoek meetmethoden

### 13.2 Conclusies casestudy

- Middels een casestudy is aangetoond dat een peilbuisonderzoek veel onduidelijkheid betreffende de veiligheid tegen piping weg kan nemen. De volgende gegevens konden met peilbuisonderzoek worden toegevoegd aan de kennis van de Zuidersluis te Almere die reeds beschikbaar was:
  - De werking ( en daarmee controle op aanwezigheid) van de verticale kwelvoorzieningen onder een op palen gefundeerde sluis.
  - De aanwezigheid en goede werking van een horizontaal afdichtende laag, bovenstrooms van het kunstwerk.
  - De richting van de stroming onder en naast het kunstwerk.
  - De richting van de stroming rond een kwelscherm. (achterloopsheid)
  - De verdeling van het verval over de verschillende kwelremmende middelen, ofwel de relatieve effectiviteit van de voorzieningen.
  - Een kwalitatief oordeel over de veiligheid tegen piping onder de meetomstandigheden.

- Na een modellering van de tijdsafhankelijkheid is meer inzicht verkregen met betrekking tot de veiligheid van het onderzochte kunstwerk op het onderdeel piping, onder toetsomstandigheden.
- Op basis van de meetresultaten wordt verwacht dat de factor 1/3 in de methode van Lane te conservatief is, als het gaat om stroming onder met de ondergrond meevormende horizontaal afdichtende lagen. De gemeten situatie in de casestudy was nog voordeliger dan een berekening van de horizontale kwelweg op basis van de factor 1.
- Fasering van het onderzoek is belangrijk want:
  - Geld en energie kunnen bespaard worden omdat een eenvoudig meetprogramma voldoende extra informatie kan bieden om een goed oordeel over een kunstwerk te geven.
  - Door te faseren hoeft het onderzoek alleen in de gewenste/noodzakelijke richting te worden uitgebreid zodat veel overbodig onderzoek achterwege kan blijven.

De tijdens de casestudy gevolgde opzet is in hoofdstuk 12 samengevat in een denkmodel.

### 13.3 Aanbevelingen

- Het maken van een 3D-stromingsmodel (in het computerprogramma EFD-lab). Met de uitkomsten van dit model een vergelijking maken tussen het model en de gemeten waarde (werkelijke situatie). Om een effect als tijdsafhankelijkheid bij de Zuidersluis te onderzoeken kan het model met de meetwaarden uit dit onderzoek worden geijkt.
- Het vinden van een methode om op een betrouwbare manier uitkomsten van dergelijke peilbuismetingen zoals gepresenteerd in dit rapport te extrapoleren naar extreme omstandigheden.
- Met de opgedane kennis over het voorbereiden en uitvoeren van peilbuismetingen gebundeld in het stappenplan uit hoofdstuk 12 een meting uitvoeren aan een kunstwerk in een getijdengebied. Het is hierbij aan te raden de aandacht te richten op de invloed van de tijdsafhankelijkheid op het verloop van het verhang.
- Een onderzoek naar de risico's van onvoldoende veiligheid tegen piping in combinatie met een onderzoek naar (eventueel nieuw te ontwerpen) adequate aanvullende kwelvoorzieningen en hun toepassing bij bestaande kunstwerken.
- Onderzoek naar het 'stampen' van een op staal gefundeerde sluis.
- Peilbuisonderzoek bij een sluis waar daadwerkelijk problemen zijn op het gebied van piping.









## Bijlagen

- Bijlage 1: overzicht meetmethoden; voordelen, nadelen en beperkingen
- Bijlage 2: situatietekening gemaal en sluis op locatie De Blocq van Kuffeler, met uitgevoerde boringen
- Bijlage 3: boorstaten van de boringen B1 en B2
- Bijlage 4: configuratie en afmetingen kwelschermen Zuidersluis
- Bijlage 5: theoretisch mogelijke kwelwegen
- Bijlage 6: toelichting op het faalmechanisme heave
- Bijlage 7: situatietekening Zuidersluis met de plaats van de meetpunten.
- Bijlage 8: maatgevende theoretische kwelweg en verhanglijnen
- Bijlage 9: tijdsafhankelijkheid
- Bijlage 10: situatietekening Zuidersluis met revisie van meetpunten (uitklapvel)
- Bijlage 11: verslag van de pulsboringen en installatie van de peilbuizen
- Bijlage 12: foto's van de Zuidersluis in aanbouw (1964)
- Bijlage 13: deel van overzichtstekening ZZWXT000146, keileemlagen



## Bijlage 1: overzicht meetmethoden

Methodes	Voordelen	Nadelen	Toepassing
Geo-elektrisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Breed scala aan eigenschappen van constructieve materialen, bodem en grondwater is te meten</li> <li>Snel en eenvoudig</li> <li>Kosten relatief laag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Moeilijk toepasbaar bij geleidende schermen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lekdetectie bij houten en betonnen schermen</li> <li>Vaststelling van laterale uitbreiding en begrenzing van bodemlagen</li> </ul>
ECR-EFT	<ul style="list-style-type: none"> <li>Weinig ruimtebeslag</li> <li>Snelle uitvoering en verwerking</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nulmeting benodigd</li> <li>Kunstmatige vergroting verval benodigd</li> <li>Nog geen ervaring in Nederland</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lekdetectie (alle materialen)</li> </ul>
Stijghoogte	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relatief goedkoop</li> <li>Weinig ruimtebeslag</li> <li>Eenvoudige interpretatie meetresultaten.</li> <li>Weinig meetpunten benodigd.</li> <li>Geschikt voor continue meting.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lange uitvoeringstijd</li> <li>Lekken opsporen moet vaak in meerdere fasen.</li> <li>Verticale positie lek niet vast te stellen</li> <li>Slecht toepasbaar in cohesieve lagen, trage respons.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkrijgen globaal beeld stijghoogte rondom constructie</li> <li>Aantonen aanwezigheid schermen en globaal de plaats van de schermen</li> </ul>
Waterspanningsmeter	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toepasbaar in cohesieve grond</li> <li>Geschikt voor continue meting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lange uitvoeringstijd</li> <li>Lekken opsporen moet vaak in meerdere fasen.</li> <li>Verticale positie lek niet vast te stellen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metten water(over)spanningen m.n. bij ophogingen.</li> <li>Aantonen en plaatsbepaling van schermen</li> </ul>
Gasinjectie		<ul style="list-style-type: none"> <li>Detectie van lekken niet goed mogelijk</li> <li>Weinig ervaring met methode</li> <li>Duur door het op veel plaatsen en diep moeten injecteren van gas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lekdetectie (alle materialen)</li> </ul>
Stromingsmeter	<ul style="list-style-type: none"> <li>Direct informatie over stroomsnelheid en richting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nog in ontwikkeling, resultaten vallen tegen</li> <li>Veel meetpunten nodig voor goed stromingsbeeld</li> <li>Resultaten weinig betrouwbaar, zeker bij lage stroomsnelheden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In kaart brengen van stroming rond het kunstwerk</li> <li>Detecteren van lekken in schermen (alle materialen)</li> </ul>
Camerasonde		<ul style="list-style-type: none"> <li>Resultaat is slechts een zeer lokaal beeld</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lekdetectie (alle materialen)</li> </ul>



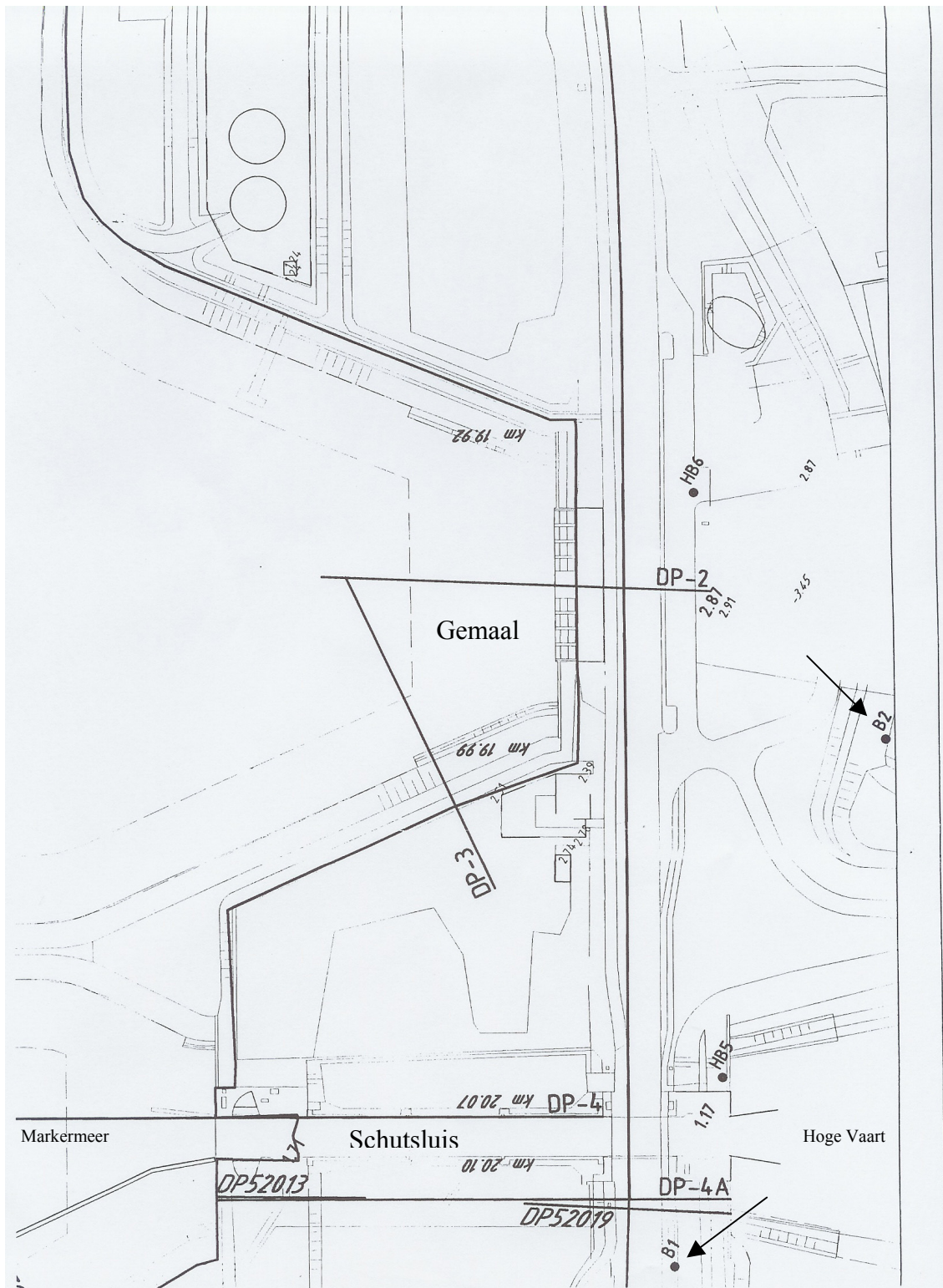
		<p>van de bodem</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Veel sonderingen nodig voor lekdetectie</li> <li>• Slechts lokaal en met behulp van tracer is een uitspraak te doen over de stromingstichting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bepaling lengte van damwandscherm</li> </ul>
Temp. sensor		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoge uitvoeringskosten</li> <li>• Weinig ervaring</li> <li>• Beperkte toepasbaarheid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detecteren van verticale grondwaterstroming</li> </ul>
Glasvezel		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alleen toepasbaar bij nieuw te bouwen constructies</li> <li>• Duur</li> <li>• Weinig ervaring</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoringinstrument bij nieuw te bouwen kunstwerken</li> <li>• Preventief</li> </ul>
Akoestische emissie		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grove methode, voor lekdetectie minder geschikt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aantonen van laagovergangen in de bodem</li> <li>• Aantonen, plaatsbepaling en bepaling lengte van schermen</li> </ul>
Elektrisch met tracer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bij horizontale constructies die een verschil in chemische samenstelling van de bodem veroorzaken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Milieubezwaar door tracer</li> <li>• Meetduur hangt af van stroomsnelheid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lekdetectie (alle materialen)</li> <li>• Stroomrichtingen in kaart brengen</li> </ul>
Seismiek		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niet nauwkeurig genoeg voor lekdetectie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bepalen van laagdikten en geologische structuren</li> <li>• Aantonen, plaatsbepaling en bepaling lengte van schermen</li> </ul>
Grondradar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weinig ruimtebeslag</li> <li>• Snel en eenvoudig</li> <li>• In combinatie met boring tot grote diepte toepasbaar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beperkte detectiediepte (ca. 5m)</li> <li>• Niet geschikt voor lekdetectie, bij gebruik vanaf maaiveld</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In combinatie met boring tot grote diepten</li> <li>• Bepalen van laagdikten en geologische structuren</li> <li>• Aantonen, bepaling plaats en lengte van schermen</li> </ul>



Slotverklikker	•	• Niet bruikbaar bij bestaande constructies	• Preventief
Betontester	•	• Gebruik bij bestaande constructies is beperkt mogelijk • Alleen harde materialen	• Bij betonnen en stalen damwanden, waarvan de bovenkant bereikbaar is.
Sondering	• Levert extra informatie op, bijvoorbeeld het in kaart brengen van de gevolgen van een lek.	• Als lekdetectie bij schermen arbeidsintensieve methode	• Opsporen discontinuïteiten in natuurlijke waterremmende lagen • In kaart brengen gevolgen van een lek



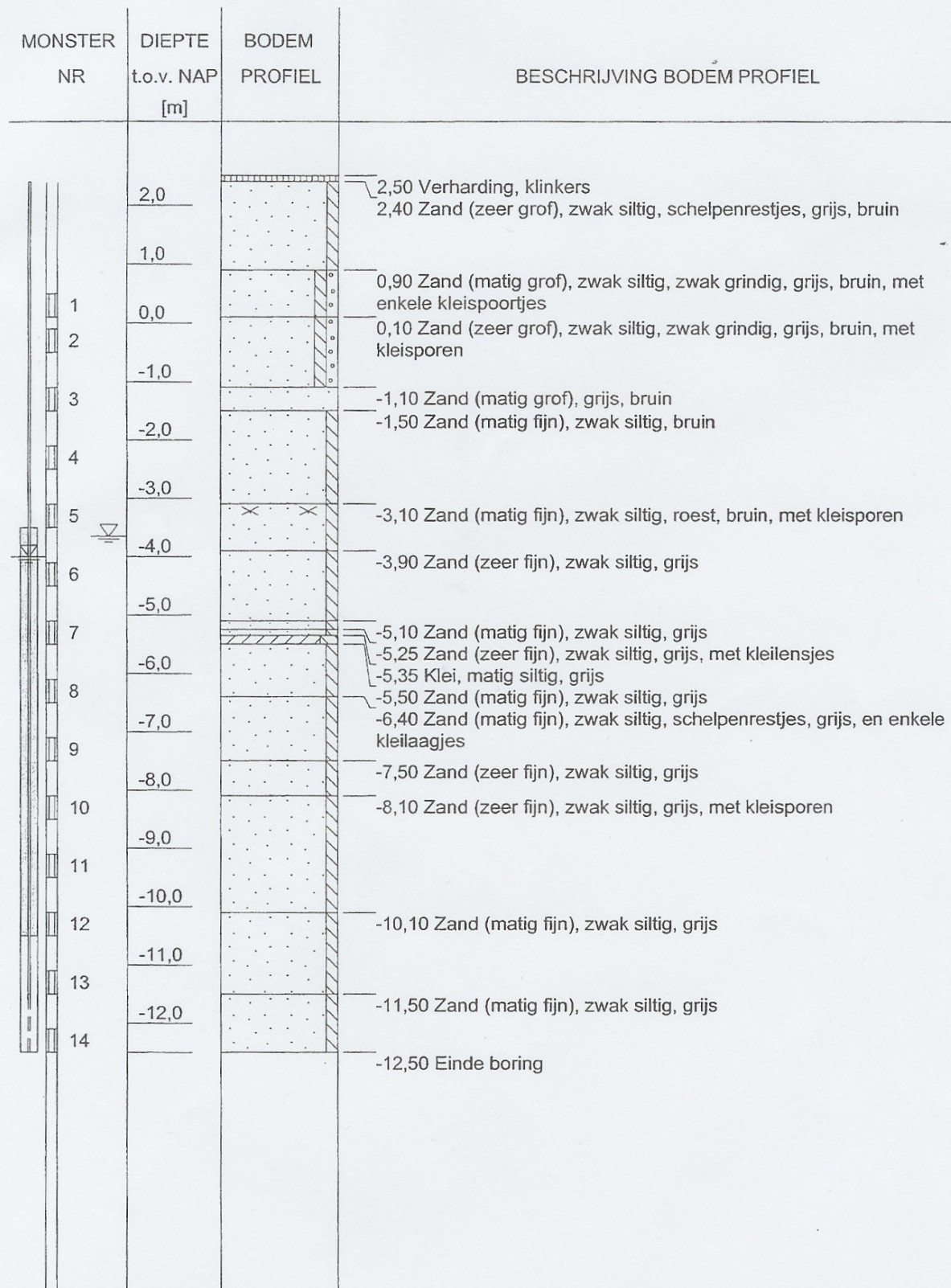
**Bijlage 2:      situatietekening gemaal en sluis op locatie De Blocq van Kuffeler, met uitgevoerde boringen**



- HB = handboring
- B1 = mechanische boring 1
- B2 = mechanische boring 2



# Bijlage 3: boring B1



Uitvoering : 13-06-2002 Boring bij : MV : NAP 2,50 m. GHG : MV - m. X : 143800,27  
 Peiling PB : 13-06-2002 Boormeester : HVD Gemeten GWS : MV - 6,15 m. GLG : MV - m. Y : 492147,21

## BORING VOLGENS NEN 5119

Grondonderzoek toetsing IJsselmeerdijken, Block van Kuffeler

Opdr. : R-4070/006  
Boring : B1





# Bijlage 3: boring B2

MONSTER NR	DIEPTE t.o.v. NAP [m]	BODEM PROFIEL	BESCHRIJVING BODEM PROFIEL	DIEPTE TEST t.o.v. NAP [m]	VOLUMIEK GEWICHT		WATER-GEHALTE w [massa %]	PORIEN-GEHALTE n [%]	VERZAD. GRAAD S [%]	ONGEDR. SCHUIFSTERKTE f <sub>undr</sub> [kPa]	HOEK INWEND. WRIJVIJING φ [°]	COHESIE c' [kPa]	OPMERKINGEN
					γ [kN/m <sup>3</sup> ]	γ <sub>sat</sub> [kN/m <sup>3</sup> ]							
1	-4.0		-3.73 Klei, sterk siltig, matig humeus, bruin, met zandresten										
	-5.0		-4.13 Zand (matig fijn), zwak siltig, bruin, met kleisporen										
	-6.0		-5.03 Zand (matig fijn), zwak siltig, donkergrijs, met kleisporen										
2	-7.0		-6.33 Zand (matig grof), zwak siltig, grijs, bruin										
	-7.0		-6.48 Klei, uiterst siltig, matig humeus, donkergrijs										
3	-8.0		-6.53 Zand (matig fijn), zwak siltig, grijs, bruin, met een enkel kleibandje										
	-8.0		-7.33 Zand (matig fijn), matig siltig, grijs, met kleibandjes										
4	-9.0		-8.33 Zand (matig grof), zwak siltig, grijs, met enkele kleilaagjes										
5	-10.0												
6	-11.0		-10.23 Zand (matig fijn), zwak siltig, grijs, met kleilaagjes										
	-11.0		-10.63 Klei, uiterst siltig, zwak humeus, grijs, met zandlaagjes (sterk gelaaagd)										
7	-12.0		-10.93 Zand (matig grof), zwak siltig, grijs										
	-12.0		-11.38 Klei, sterk siltig, matig humeus, donkergrijs										
	-12.0		-11.43 Zand (matig fijn), zwak siltig, houtresten, grijs										
8	-13.0		-12.73 Klei, sterk siltig, zwak humeus, grijs, met zandlaagjes										
	-13.0		-13.33 Klei, zwak zandig, zwak humeus, grijs	-13.48	19.6	16.4	19.4	37.0	87.5				
9	-14.0												
10	-15.0		-14.33 Zand (zeer fijn), zwak siltig, grijs, met enkele kleilaagjes										
	-15.0		-15.33 Zand (matig fijn), zwak siltig, grijs										
11	-16.0		-15.33 Zand (matig fijn), zwak siltig, grijs										
	-16.0		-15.53 Zand (matig grof), zwak siltig, grijs										
12	-17.0												
13	-18.0		-17.73 Zand (matig grof), zwak siltig, zwak grindig, grijs										
14	-18.0		-18.73 Einde boring										

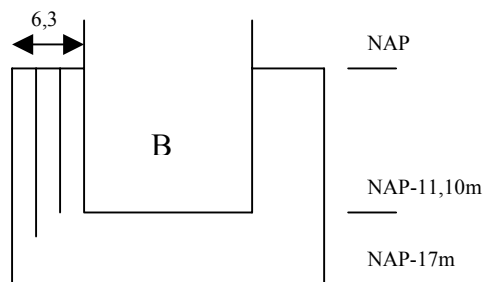
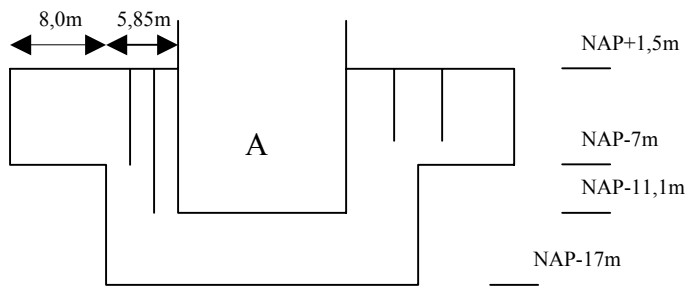
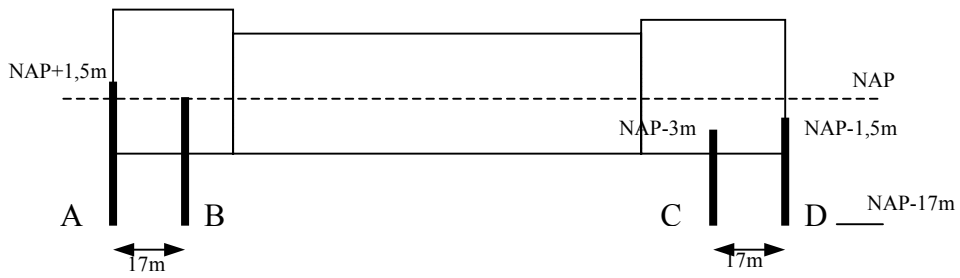
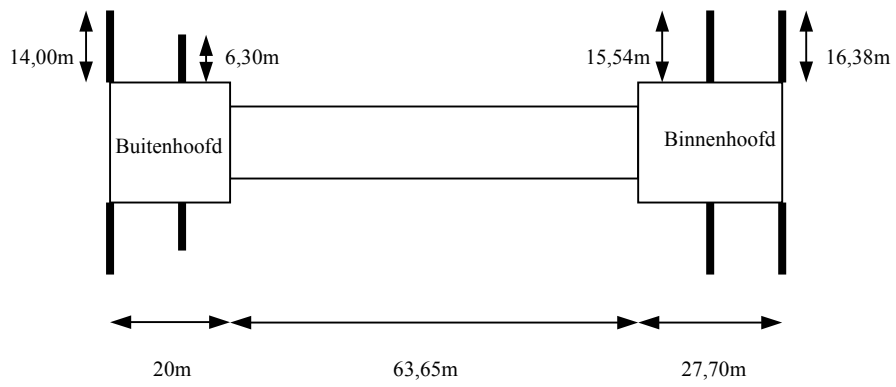
Uitvoering : 11-05-2002 Boring bij : MV : NAP : -3.73 m. GHG : MV X : 143925.31  
 Pelling PB : 11-05-2002 Boormester : HVD Gmaten GWS : MV GLG : MV Y : 482164.75

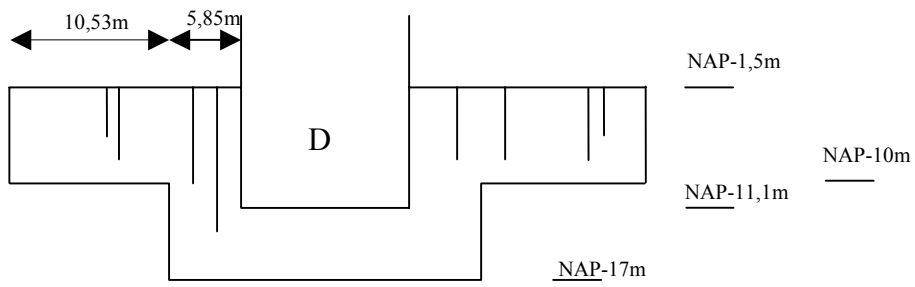
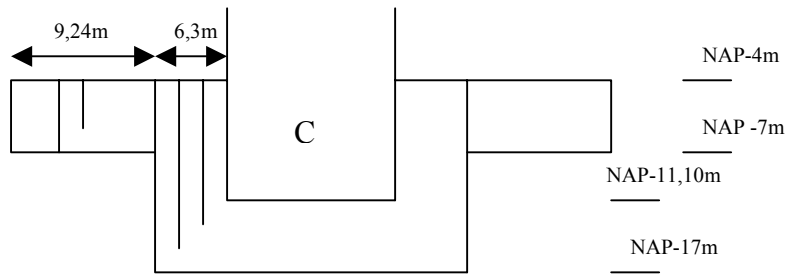
**BORING VOLGENS NEN 5119**  
 Grondonderzoek toetsing IJsselmeerdijken, Block van Kuffeler

Opdr. : R-4070/006  
 Boring : B2



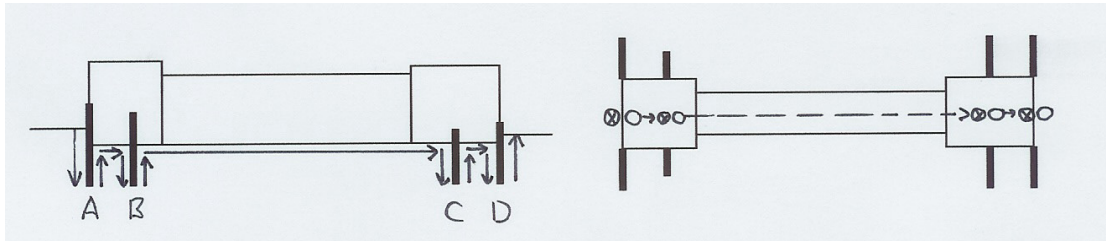
### Bijlage 4: configuratie en afmetingen kwelschermen Zuidersluis





## Bijlage 5: theoretisch mogelijke kwelwegen

A) Onderlooptheid onder alle diepe schermen door



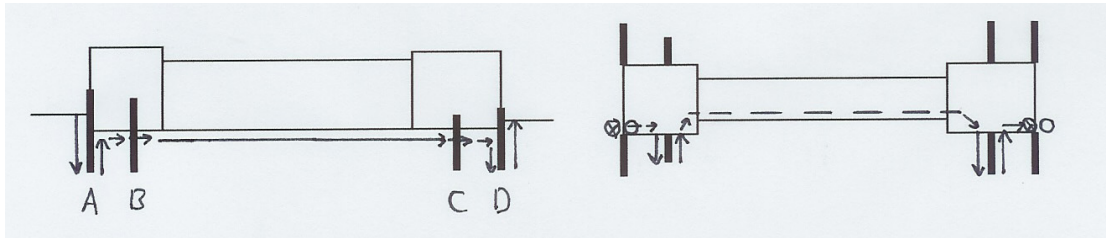
- 1) Verticaal van intreepunt (NAP-3,90) naar onderkant onderlooptheidscherm op NAP-17 en vervolgens omhoog naar de onderzijde van de sluisbodemp op NAP-11,10. Bijdrage aan kwelweg bedraagt:  $13,1 + 5,90 = 19\text{m}$
- 2) Vervolgens horizontaal door spleet naar scherm B. Hier onderdoor gaan levert  $2 \times 5,90 = 11,80\text{m}$
- 3) Vervolgens weer horizontaal onder de sluiscolk door tot scherm C. Hier bedraagt de verticale kwelweg eveneens  $11,80\text{m}$ .
- 4) Horizontaal door de spleet tot het laatste kwelscherm, waar de verticale kwelweg  $5,90 + 8,20 = 14,1\text{m}$

Horizontaal:  $111,35\text{m}$

Verticaal:  $56,7\text{m}$

Gewogen totale kwelweg:  $0 \times 111,35 + 56,7 = 56,7\text{m}$

B) Onderlooptheid, horizontaal om schermen B en C heen



- 1) idem A1
- 2) Horizontaal door spleet, vervolgens horizontaal om scherm B heen, levert  $1/3 \times 6,30 = 2,10 + 1/3 \times (5 + 6,30) = 5,8$ . Opm. 5m is afstand zijkant buitenhoofd tot kolk
- 3) Bij scherm C eveneens horizontaal er omheen,  $1/3 \times 6,30 + 1/3 \times (3,60 + 6,30) = 5,4\text{m}$ . Opm. 3,60 is afstand binnenhoofd tot kolk.
- 4) Idem A4

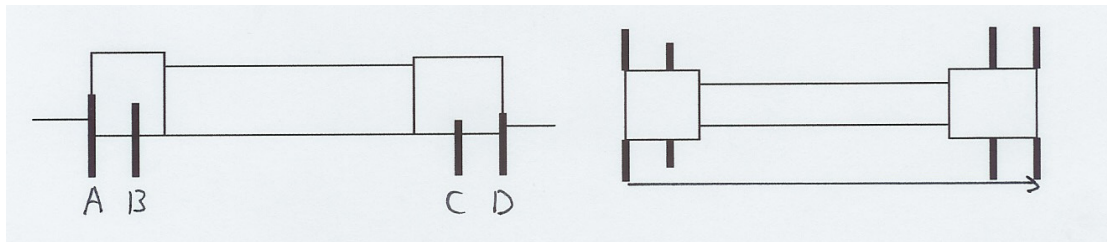
Horizontaal:  $33,8\text{m}$

Verticaal:  $33,1\text{m}$

Gewogen totale kwelweg:  $1/3 \times 33,8 + 33,1 = 44,3\text{m}$



C) Achterloopsheid, volledig horizontaal van intree- tot uittreepunt om schermen heen



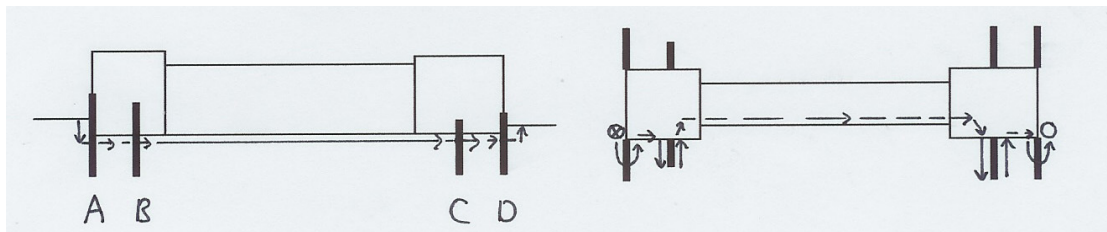
- 1) Als intreepunt wordt het uiteinde van kwelscherm A genomen. Dit is een veilige aanname omdat voor het scherm een talud aanwezig is en dit eigenlijk al bijdraagt aan de kwelweglengte.
- 2) Vervolgens horizontaal langs de schermen B, C en D naar het uittreepunt direct aan het uiteinde van scherm D. De kwelweg is gelijk aan  $1/3 \times 111,35$  (=lengte sluis) = 37,1m

Horizontaal: 111,35m

Verticaal: 0m

Gewogen totale kwelweg:  $1/3 \times 111,35 = 37,1\text{m}$

D) Achterloopsheid, stroming op het niveau van de sluisvloer, onder korte achterloopsheidschermen door.



- 1) Het intreepunt wordt bovenstrooms van het buitenhoofd genomen. Vervolgens verticaal naar de onderzijde van de sluisvloer. Deze kwelweg bedraagt 7,20.
- 2) Om scherm A heen levert een bijdrage van  $1/3 \times 2 \times 5,85 = 3,90\text{m}$
- 3) Vervolgens onder de sluisvloer door naar scherm B en daar omheen. Deze kwelweg wordt:  $1/3 \times 2 \times 6,30 = 4,20$
- 4) Idem bij scherm C; kwelweg = 4,20m
- 5) Horizontaal om scherm D heen en vervolgens van onderkant bodem (NAP-11,1) omhoog tot de bodem op NAP-8,80 levert:  $1/3 \times 2 \times 5,85 = 3,9 + 2,30 = 6,2\text{m}$

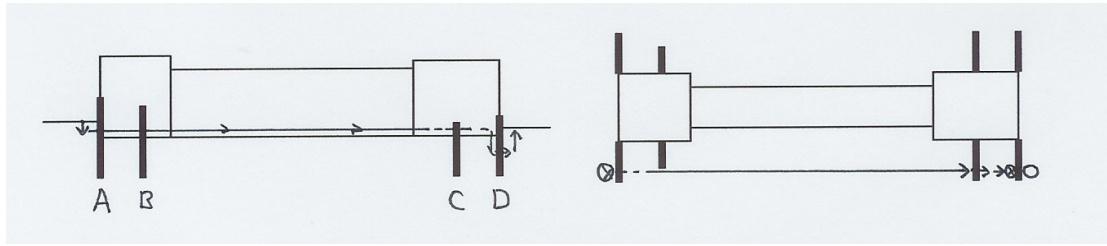
Horizontaal: 48,6m

Verticaal: 9,50m

Totale kwelweg:  $1/3 \times 48,6 + 9,5 = 25,7\text{m}$



E) Achterloopsheid, langs scherm B, onder C door, verticaal bij A en D



- 1) Verticaal van NAP-3,90 naar onderkant scherm A op NAP-7. Kwelweg bedraagt 3,1m
- 2) Horizontaal van scherm A naar C. De afstand is 94,35m zodat de kwelweg wordt  $\frac{1}{3} \times 94,35 = 31,45\text{m}$
- 3) Vervolgens onder C door op niveau NAP-7 (= onderkant scherm) en 17 meter horizontaal naar D. Kwelweg =  $\frac{1}{3} \times 17 = 5,6\text{m}$
- 4) Van NAP-7 tot NAP-10. Vervolgens van NAP-10 naar bodem op NAP-8,80. De kwelweg van dit onderdeel is 4,20m

Horizontaal: 111,35m

Verticaal: 7,3m

Gewogen totale kwelweg:  $\frac{1}{3} \times 111,35 + 7,3 = 44,3\text{m}$

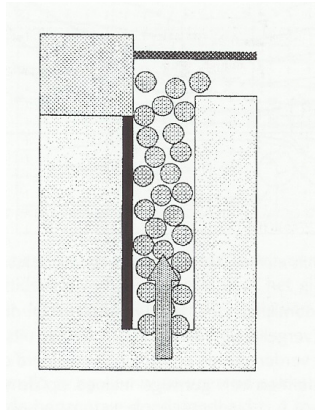


## Bijlage 6: toelichting op het faalmechanisme heave

In deze bijlage is een korte omschrijving van het mechanisme heave opgenomen, alsmede grafiek A.I.2 uit het Technisch rapport Zandmeevoerende Wellen die is gebruikt bij de toetsing op dit mechanisme.

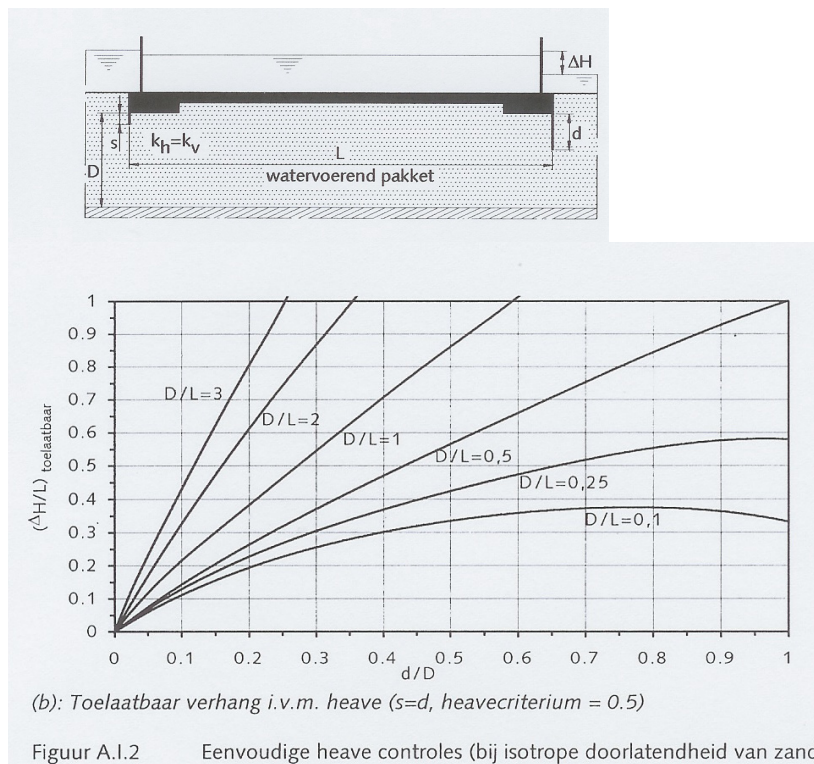
De definitie van heave zoals bedoeld in dit rapport is:

Een situatie waarbij verticale korrelspanningen in een zandlaag wegvallen onder invloed van een verticale grondwaterstroming (zie figuur I).



**Figuur I: mechanisme heave**

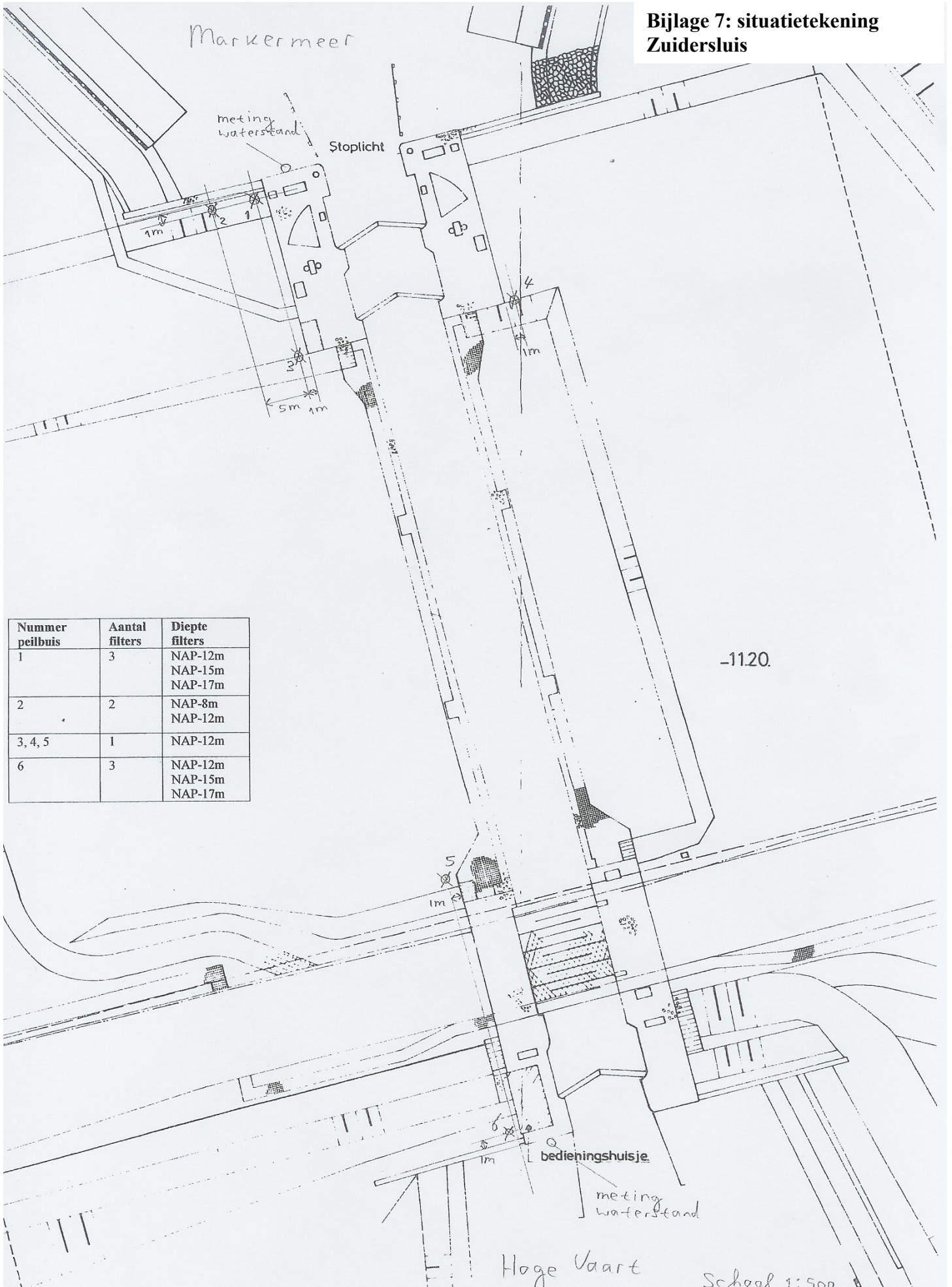
Bij de toetsing in paragraaf 3.2 is gebruik gemaakt van grafiek A.I.2 uit het Technisch rapport Zandmeevoerende Wellen, zie figuur II.



**Figuur II: controle op heave, figuur A.I.2 uit Technisch rapport Zandmeevoerende wellen**



**Bijlage 7: situatietekening  
Zuidersluis**

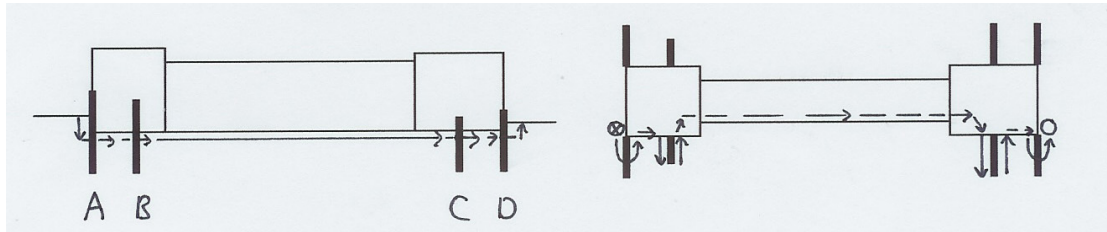




## Bijlage 8: maatgevende theoretische kwelweg en verhanglijnen

In het meetplan is de volgende theoretisch kortste kwelweg berekend:

Achterloopsheid, stroming op het niveau van de sluisvloer, onder korte achterloopsheidschermen door.



- 6) Het intrepunt wordt bovenstrooms van het buitenhoofd genomen. Vervolgens verticaal naar de onderzijde van de sluisvloer. Deze kwelweg bedraagt 7,20.
- 7) Om scherm A heen levert een bijdrage van  $\frac{1}{3} \times 2 \times 5,85 = 3,90\text{m}$
- 8) Vervolgens onder de sluisvloer door naar scherm B en daar omheen. Deze kwelweg wordt:  $\frac{1}{3} \times 2 \times 6,30 = 4,20$
- 9) Idem bij scherm C; kwelweg = 4,20m
- 10) Horizontaal om scherm D heen en vervolgens van onderkant bodem (NAP-11,1) omhoog tot de bodem op NAP-8,80 levert:  $\frac{1}{3} \times 2 \times 5,85 = 3,9 + 2,30 = 6,2\text{m}$

Horizontaal: 48,6m

Verticaal: 9,50m

Totale kwelweg:  $\frac{1}{3} \times 48,6 + 9,5 = 25,7\text{m}$

Op basis van de kwelweg kan voor elk deel van de route het verhang worden berekend. Omdat het om een indicatie gaat wordt dit globaal gedaan.

Onder normale omstandigheden (meetconditie) bedraagt het verval over de sluis 5,2m. Uitgaande van een evenredige afname over de totale kwelweg (dus een homogene en isotrope bodem) betekent dit dat per meter kwelweg de stijghoogte,  $\frac{5,2\text{m}}{25,7\text{m}} = 0,21\text{m}$ , moet afnemen.

Het potentiaalverschil over de schermen kan hiermee worden berekend:

- Scherm A:  $(7,20\text{m} + 3,90) \times 0,21 = 2,25\text{m}$
- Scherm B:  $4,20 \times 0,21 = 0,85\text{m}$
- Scherm C:  $4,20 \times 0,21 = 0,85\text{m}$
- Scherm D:  $6,20 \times 0,21 = 1,25\text{m}$



## Bijlage 9: tijdsafhankelijkheid

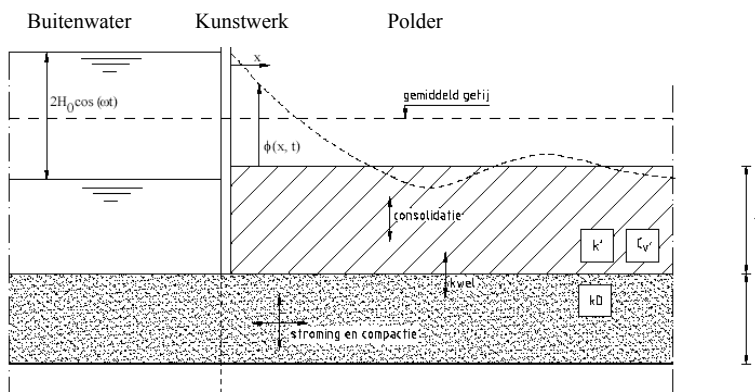
### Inleiding

De stijghoogte achter waterkerende kunstwerken is evenals die bij dijken afhankelijk van de fluctuatie van de buitenwaterstand in de tijd. Bij elk kunstwerk dient o.a voor een goede beoordeling van de onder- en achterloopsheid onderzocht te worden hoe groot die tijdsafhankelijkheid is. Als gerekend wordt met extreme waarden die in werkelijkheid slechts kort aanhouden maar eenvoudigheidshalve toch als stationair worden beschouwd ontstaat een vertekend (slechter) beeld van de veiligheid tegen het mechanisme piping.

Gezocht wordt naar een modellering van de tijdsafhankelijkheid van de stijghoogte aan de polderzijde/binnenzijde van het waterkerende kunstwerk als gevolg van een variërende buitenwaterstand aan de buitenzijde. Als eerste benadering wordt gebruik gemaakt van dezelfde procedure als bij dijken. Deze staat beschreven in bijlage 4.5 van het Technisch Rapport (TR) Waterspanningen bij dijken [4, hoofdstuk 7].

### Modellering volgens Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken

De situatie wordt geschematiseerd als in figuur 1. Een waterkerende kunstwerk (geschematiseerd als waterkerende muur) vormt de scheiding tussen buitenwater en water in de polder. Onder het kunstwerk loopt een watervoerend zandpakket dat homogeen en oneindig stijf wordt verondersteld. Aan de polderzijde bevindt zich een slecht waterdoorlatende kleilaag, waarin consolidatie mogelijk is. Hiermee wordt de waterdichte vloer van het kunstwerk geschematiseerd. Getracht wordt met deze relatief eenvoudige benadering inzicht te verkrijgen in de respons van de stijghoogte aan de binnenzijde op fluctuaties in de buitenwaterstand.



*Figuur 1: modellering respons op variërende buitenwaterstand. N.B. de grafiek van de stijghoogte,  $\phi(x,t)$ , in deze figuur, zou moeten fluctueren om het gemiddeld getij, in plaats van om de bovenzijde van de kleilaag!*

Er wordt gebruik gemaakt van de volgende (empirische) formule voor de verandering van de potentiaal in het watervoerende zandpakket:

$$\phi(x,t) = H_0 \cdot e^{(-0,924x/\lambda_w')} \cdot \cos(\omega t - 0,383x/\lambda_w')$$

waarin:  $\lambda'_w = \sqrt{(kD/k')\sqrt{c'_v/\omega}}$

De e-macht term in de uitdrukking geeft de demping weer. De cosinusterm geeft de faseverschuiving aan. Het zand wordt in deze formule gemodelleerd als relatief stijf. Er wordt dus geen rekening gehouden met elastische berging in het zand.

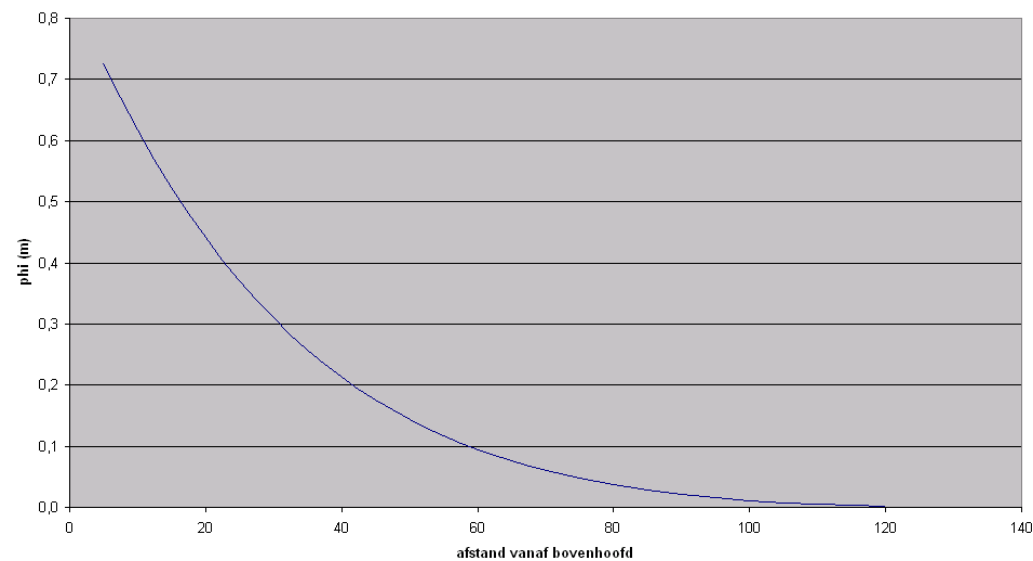
Als randvoorwaarde aan de buitenzijde (waar de waterstand fluctueert) geldt de volgende uitdrukking:

$$\phi(0, t) = H_0 \cdot \cos(\omega t)$$

Met bovenstaande modellering van de tijdsafhankelijkheid is een aantal simulaties uitgevoerd om het effect van de verschillende parameters op demping en faseverschuiving te onderzoeken.

### Uitkomsten simulaties

Uit bestudering van de formule voor de stijghoogte in het zandpakket kan reeds een beeld worden verkregen van de invloed van de verscheidene parameters in de formule. Met enkele simulaties in het spreadsheetprogramma Excel is getracht meer inzicht te verkrijgen in het effect van elke variabele.



Figuur II: theoretisch verloop van de potentiaal over de lengte van de sluis.

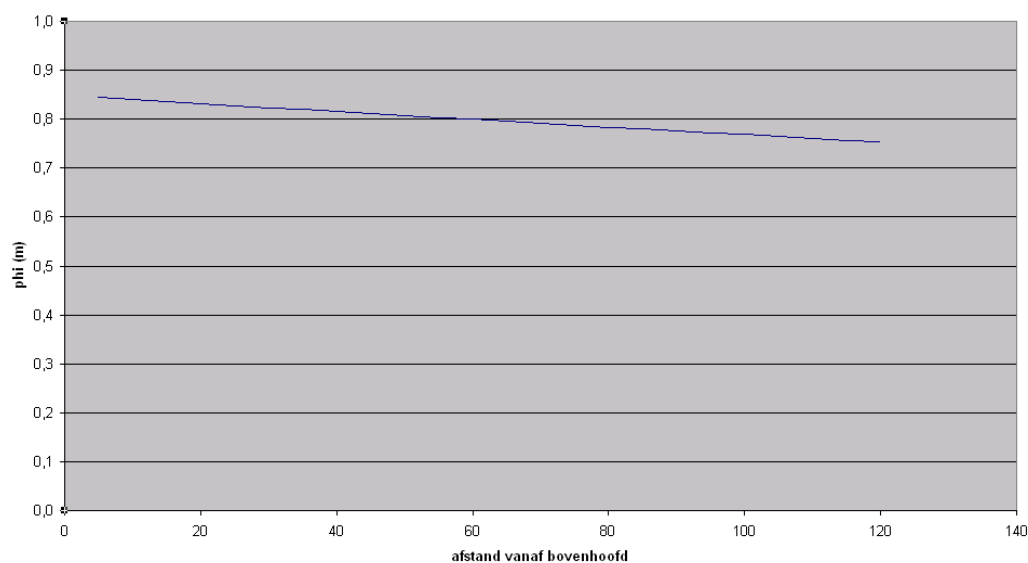
De factor  $\lambda'_w$  blijkt een maat voor de indringing van de cyclische buitenwaterstand te zijn. Op een afstand van ca. 3 maal  $\lambda'_w$  is de respons nog ca. 5% van  $H_0$ . Met een eenvoudige spreadsheet is derhalve voor een kunstwerk met lengte  $x$  te berekenen wat de respons is aan de benedenstroomse zijde van het kunstwerk bij verschillende waarden van  $\lambda'_w$ . In figuur II is het verloop te zien van de potentiaal onder de Zuidersluis bij een invoer  $k = k' = 1e^{-5}$ . Als periode is de periode van een getijgolf genomen. Ter plaatse van de mogelijk uitstroompunten is de invloed van de golf nagenoeg verdwenen.



Het effect van de demping (exponentterm) op de stijghoogtevariatie is veel groter dan dat van de faseverschuiving. Slechts in gevallen waarbij sprake is van snelle fluctuaties (periode <20s) is een faseverschuiving significant voor de grootte van de stijghoogte.

Uiteraard betekent een grote doorlatendheid van het watervoerende zandpakket dat de respons op fluctuaties aan de benedenstroomse zijde groot is. Omdat wordt uitgegaan van een kunstwerk met waterdichte vloer in plaats van een dijk krijgt de kleilaag zoals gezegd de functie van waterdichte vloer. Dit wordt in het model gerealiseerd door een zeer kleine waarde voor  $k'$ . De bijbehorende consolidatiecoëfficiënt  $c_v'$  kan in dit geval als relatief groot worden aangenomen. De rek is immers 0 zodat de factor  $m_v$  uit

de uitdrukking  $c_v' = \frac{k'}{\gamma_w(m_v + n\beta)}$  verdwijnt.



**Figuur III: potentiaalverloop bij zeer lage doorlatendheid van de kleilaag**

Uit beschouwingen met een zeer kleine  $k'$  en een relatief grote  $c_v'$  blijkt dat zelfs bij kleine periode de respons op de fluctuatie 1 op 1 naar benedenstrooms wordt doorgegeven. Het dempende effect van de kleilaag is hiermee volkomen verdwenen. De enige demping die dan nog te verwachten valt komt uit elastische berging van het zand. Die wordt in dit theoretische model echter niet meegenomen. In deze situatie blijft de doorlatendheid van de zandlaag over als meest bepalende factor. Het mag duidelijk zijn dat bij een steeds lagere doorlatendheid de respons benedenstrooms meer gedempt is.

## 2-dimensionaal

Het grote probleem bij de gevolgde schematisering is het tweedimensionaal blijven van de modellering. Bij de Zuidersluis is sprake van stroming via een spleet waarbij alleen de remmende werking van schermen aanwezig is. Echter niet overal stroomt het grondwater via de spleet. De stroming ondervindt dus wel degelijk weerstand van het bodemmateriaal. Een situatie als in figuur III zal niet snel voorkomen.



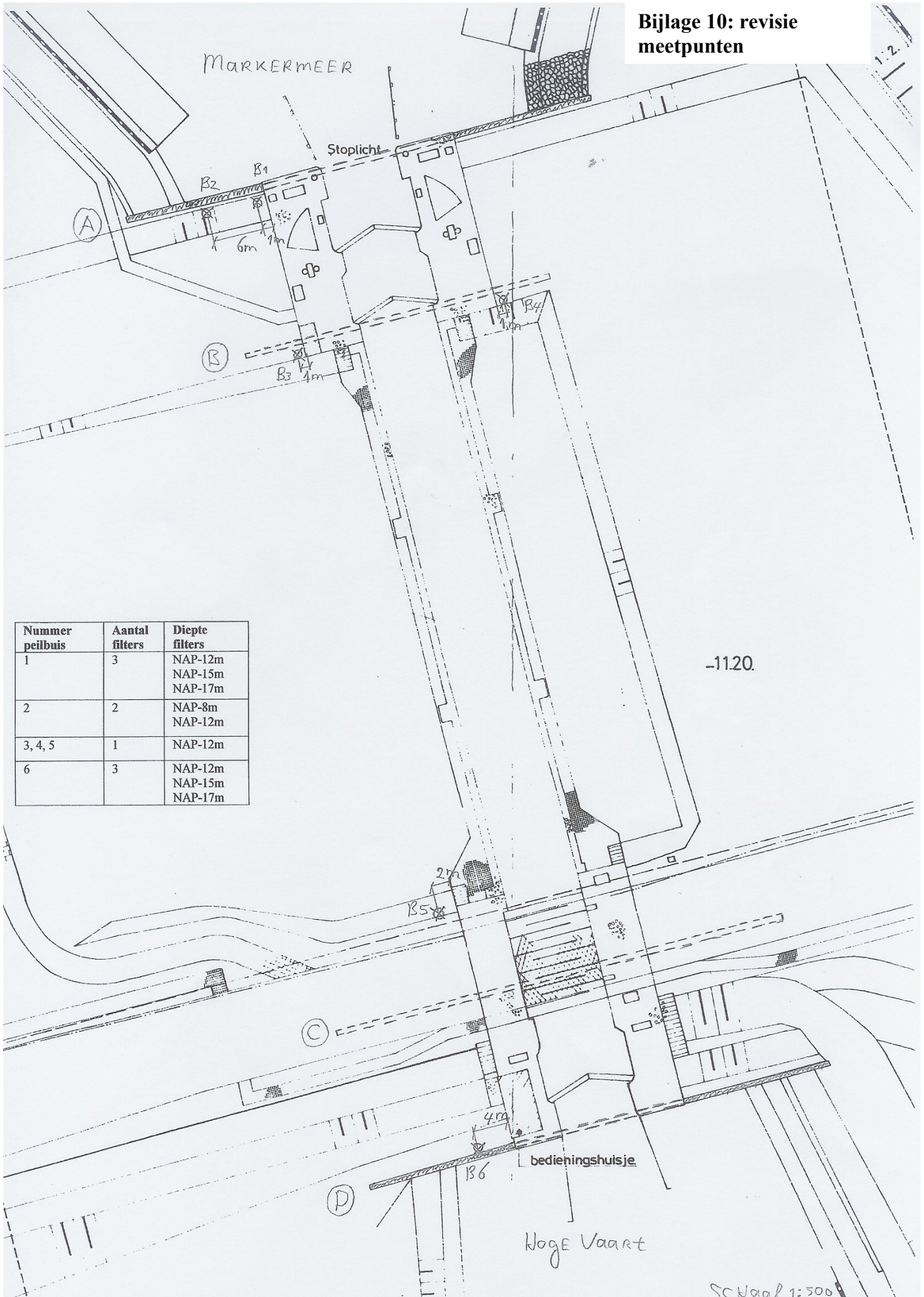
## **Conclusie**

Uiteraard zal in werkelijkheid geen sprake zijn van een ideale situatie zoals in bovenstaande geschetst. Bovendien levert elke combinatie van parameters een ander beeld van de tijdsafhankelijkheid en zijn slechts summier enkele verbanden te geven. Dit leidt er toe dat van elk kunstwerk afzonderlijk een modellering moet worden gemaakt, waarbij het bovenstaande model als basis kan dienen.

Afwijkende situaties kunnen bijvoorbeeld ontstaan als gevolg van een heterogene bodemopbouw of een voorland dat snel intreden van water bemoeilijkt. In dit geval moet een aangepast model worden gebruikt. In het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken [4] is een voorbeeldberekening opgenomen voor een dijk met voorland. Voor een eerste indruk van het effect van tijdsafhankelijkheid kan, op dezelfde manier als in bovenstaande, de modellering worden aangepast voor gebruik bij een kunstwerk.



**Bijlage 10: revisie meetpunten**



Nummer peilbuis	Aantal filters	Diepte filters
1	3	NAP-12m NAP-15m NAP-17m
2	2	NAP-8m NAP-12m
3, 4, 5	1	NAP-12m
6	3	NAP-12m NAP-15m NAP-17m



## **Bijlage 11: verslag van de pulsboringen en installatie van de peilbuizen**

### **maandag 6 juni 2005**

Twee werknemers van het bedrijf De Ruiters Boringen en Bemalingen (onderdeel van BAM NBM infratechniek) arriveren rond 10:00h op de meetlocatie bij de Zuidersluis. Vanwege vertraging bij het laden van het materiaal/materieel ruim drie uur later dan gepland. Direct na aankomst samen met Jan Tigchelaar de twee werknemers ontvangen en het werk doorgenomen. Met vier man over het terrein gelopen en a.d.h.v. de overzichtskaart uit de offerte de plaats van de meetpunten aangegeven. Duidelijk werd dat de meetpunten 5 en 6 de meeste problemen op zouden leveren. Meet punt 5 vanwege de ligging in een talud, ingeklemd tussen een vuilcontainer en een heg, en meetpunt 6 vanwege de slechte bereikbaarheid en onveilige situatie aan de rand van de Hoge Vaart.

Na het lossen van het materieel en materiaal wordt de boorwagen geïnstalleerd bij meetpunt 1, naast het buitenhoofd. De aangegeven locatie wordt exact overgenomen. Het punt komt 1 meter uit de wand van het bovenhoofd en ca. 30 cm achter het kwelscherm/grondkering. De hele verdere dag wordt gebruikt voor het pulsbooren tot een diepte van NAP-18m. Rond 16:00 uur is de casing op diepte gebracht.

### **dinsdag 7 juni 2005**

De boorploeg begint om 7:00 uur. De peilbuizen in B1 worden geplaatst en de filters worden aangebracht. Tussen de verschillende filterniveaus wordt een afdichting gemaakt met kleikorrels, zodat de filters elkaar niet beïnvloeden.

Na schoonzuigen van de drie stijgbuizen en afwerken van het boorgat met een straatputje wordt begonnen met meetpunt 2. Hier wordt direct bij het pulsen van de eerste buis iets hard aangetroffen. Na een blik op de moeren aan de buitenzijde van het kwelscherm blijkt het om een ankerstang te gaan. Zonder overleg wordt besloten het punt ca. één meter op te schuiven, van het buitenhoofd af. De afstand tot de wand wordt hiermee ongeveer 7 meter in plaats van de voorgeschreven 6 meter.

's Middags wordt een doorgaande waterpassing uitgevoerd door een projectleider en uitvoerder van De Ruiters. Samen met de opdrachtgever worden de meetpunten uitgezet. Bij de waterpassing wordt gebruik gemaakt van een hoogtebout in de gevel van het gemaal De Blocq van Kuffeler. In overleg met de boorploeg wordt besloten meetpunt 6 te verplaatsen. De opdrachtgever wil de boring zoveel mogelijk volgens tekening. Om uitvoeringstechnische en veiligheidsredenen wordt uiteindelijk beslist dat de boring 4 meter uit de wand van het binnenhoofd wordt uitgevoerd. Deze plaats wijkt 3 meter af van de gewenste situatie.

Om ca. 16:00 uur is boring 2 op diepte (NAP-13m) en is de ook de waterpassing voltooid.



### **woensdag 8 juni 2005**

Rond 9:00 uur zijn de peilbuizen in boorgat 2 aangebracht. Het geheel is afgewerkt met een straatputje. Hierna volgt boring 3. Deze moet tot een diepte NAP-13m worden uitgevoerd. Het niveau van het filter komt hiermee op de gewenste diepte van NAP-12m.

Na boren wordt de stijgbuis aangebracht en het filtermateriaal naar beneden gestort. Voorzichtig wordt vervolgens de metalen casing weer getrokken.

Meetpunt drie wordt 's middags afgemaakt en het materieel wordt verplaatst naar meetpunt 5. Dit punt is dinsdag reeds besproken. Met een witte spuitbus is de plaats gemarkeerd. Er wordt een begin gemaakt met het pulsen van boring 5.

### **donderdag 9 juni 2005**

's Ochtends wordt boring 5 afgerond. Ook hier is sprake van een enkele filterbuis. Hooguit de plaats leverde enige vertraging op. Het boorapparaat is met enige moeite waterpas afgesteld. Bij de boring kwamen evenals bij meetpunt 1 stukken asfalt en hout naar boven. Waarschijnlijk van ongeveer dezelfde diepte.

Het installeren van het materieel voor het aanbrengen van de buizen op meetpunt 6 kost veel moeite. Het aflopen van een rupsband van het boorvoertuig levert een vertraging op van ca. 3 uur. De technische dienst van De Ruiters moet e.e.a. herstellen.

Geleerd van de ervaring bij meetpunt twee wordt hier eerst gecontroleerd of er ankers in de weg zitten. Dat is inderdaad het geval, zodat het meetpunt nog iets opschuift uit de wand van het binnenhoofd. De totale afstand uit de wand komt hiermee op ruim vier meter, drie meer dan aangegeven in het meetplan.

De boring verloopt voorspoedig. Op grotere diepte wordt zeer fijn zand gevonden. De eerste peilbuis wordt aangebracht, samen met het filter. De apparatuur wordt achtergelaten voor de volgende dag.

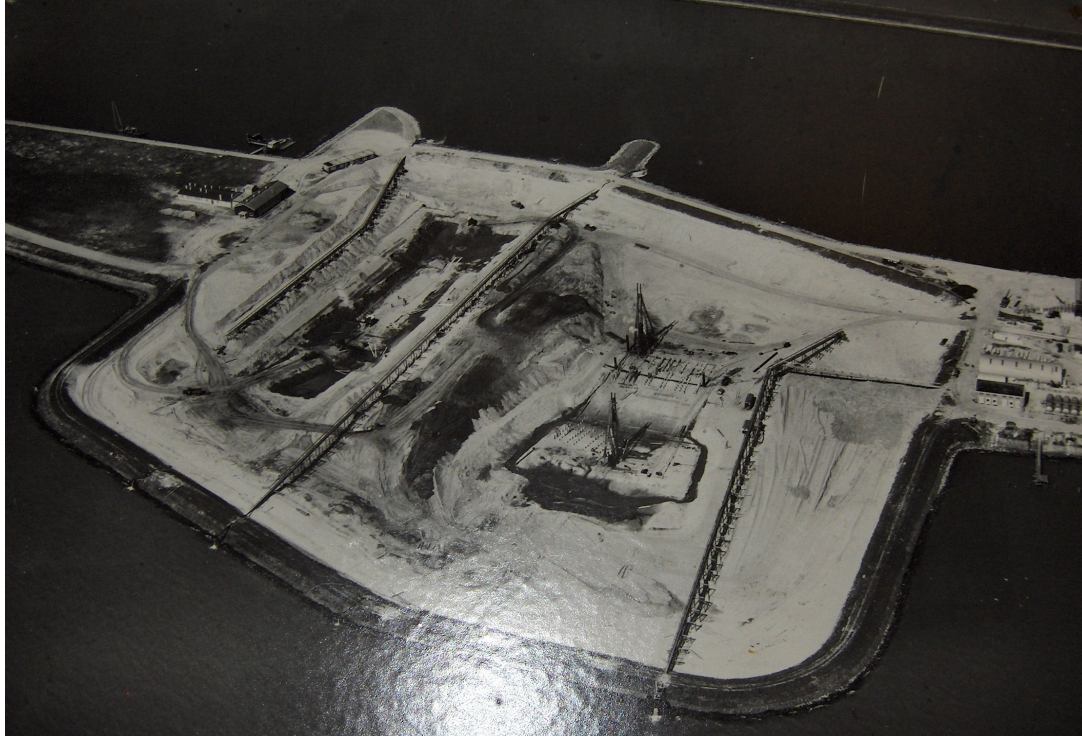
### **vrijdag 10 juni 2005**

's Ochtends worden de resterende buizen geplaatst in boorgat 6. Het geheel wordt adequaat afgewerkt. Het materieel wordt weer naar boven getransporteerd en naar de plaats van boring vier (aan de oostzijde van de sluis) gebracht. Hier wordt de apparatuur weer geïnstalleerd. Zonder problemen wordt tot NAP-13m geboord. Ook hier hoeft slechts één buis aangebracht te worden. Het boorgat wordt afgewerkt en rond 15:00 uur is het materiaal opgeruimd en de serie van 6 boringen gecompliceerd.





**Bijlage 12: foto's van de Zuiderluis in aanbouw (1964)**



# Bijlage 13: overzicht keilemlagen

