

Gebiedsbreed schade onderzoek aan panden Almelo de Haandrik kanaal



Gebiedsbreed schade onderzoek aan panden Almelo de Haandrik kanaal

Gebiedsbreed schade onderzoek aan panden Almelo de Haandrik kanaal

Opdrachtgever	Provincie Overijssel, ZWOLLE
Contactpersoon	T. Stienstra
Referenties	Offerte Deltares: 11203512-0004-GEO-0002, van 8 februari 2019 Opdrachtverlening provincie Overijssel: 4500008715 van 15 maart 2019
Trefwoorden	Schadeonderzoek, Baggerwerkzaamheden, Grondwaterverstoring, Trillingsmetingen, Hinder, Verkeertrillingen, Scheeppassages

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	21-06-2021
Projectnummer	11203512-005
Document ID	11203512-005-GEO-0015
Pagina's	201
Status	definitief

Samenvatting

Inleiding

Tussen 2011 en 2016 zijn er werkzaamheden uitgevoerd om het kanaal Almelo - de Haandrik geschikt te maken voor grotere scheepvaart. Omwonenden hebben aangegeven dat er sinds de uitvoering van deze werkzaamheden schade aan hun woningen en percelen is opgetreden. De Provincie Overijssel heeft als gevolg van de schademeldingen Deltares gevraagd om een onderzoek in te stellen naar de relatie tussen deze schade en de werkzaamheden. De Provincie heeft TNO gevraagd een onderzoek te doen naar de schadebeelden in 29 panden.

Deltares heeft onderzocht wat de relatie op gebiedsniveau is tussen de schadebeelden en de uitvoering van de werkzaamheden aan het kanaal.

De werkzaamheden aan het kanaal omvatten baggeren, het inbrengen van damwanden en ankers en het vervangen van bruggen. Het onderzoek naar de schade oorzaken spitst zich toe op een vijftal hoofdonderdelen:

- Het vaststellen van schadebeelden aan de panden.
- Stijging van de grondwaterstand door de baggerwerkzaamheden.
- Trillingen door de uitvoering van diverse werkzaamheden (installatie damwanden en ankers).
- De invloed van andere trillingsbronnen zoals het (on)gecontroleerd sluiten van bruggen, wegverkeer en scheepvaart.
- Ongelijkmatige zettingen als gevolg van de werkzaamheden, waaronder het baggeren.

Aanpak

Het onderzoek is gebaseerd op de inventarisatie van de schadebeelden, analyse van beschikbare of uitgevoerde trillings-, en grondwaterstandsmetingen en een set gegevens van de Provincie Overijssel. Op basis hiervan zijn berekeningen en analyses uitgevoerd om de relatie te onderzoeken tussen de geconstateerde schadebeelden en de uitgevoerde werkzaamheden. Het onderzoek spitst zich toe op een aantal oorzaken die mede zijn geïdentificeerd in nauw overleg met de omwonenden.

Het onderzoek is uitgevoerd tussen 15 maart 2019 en 17 maart 2020. Het onderzoek baseert zich op gegevens die tot 9 maart 2020 zijn ingewonnen.

Het onderzoek gaat in op de oorzaak van de schade in het gehele gebied langs het kanaal. Het gaat overeenkomstig de opdracht, niet in op de gevolgen voor iedere woningeigenaar afzonderlijk.

Het rapport geeft per mogelijke oorzaak conclusies over de relatie tussen de werkzaamheden en de geconstateerde schadebeelden.

Na een samenvatting van de schadebeelden worden hierna de belangrijkste conclusies per oorzaak weergegeven. Een technische samenvatting verwoordt de conclusies meer in detail.

Vastgestelde schadebeelden

TNO heeft het onderzoek naar de schadebeelden uitgevoerd op 29 panden in Vroomshoop en omgeving. Het onderzoek omvat een inventarisatie van de scheuren van de panden na de werkzaamheden. Voor sommige panden is historische informatie bekend van vóór de werkzaamheden. Uit het TNO onderzoek blijkt dat:

- Een deel van de vastgestelde schade waarschijnlijk gerelateerd is aan trillingen.
- Een deel van de schade waarschijnlijk is ontstaan door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.
- In nagenoeg alle panden ook scheuren aanwezig zijn die niet gerelateerd kunnen worden aan werkzaamheden in en rond het kanaal.

Relatie tussen werkzaamheden en schadebeelden

Het baggeren van de sliblaag op de bodem van het kanaal kan in beginsel leiden tot een tijdelijke stijging van de grondwaterstand, die leidt tot ongelijkmatige zettingen van de ondergrond en wateroverlast.

Stijging van de grondwaterstand door de baggerwerkzaamheden

Een stijging van de grondwaterstand als gevolg van de uitgevoerde baggerwerkzaamheden tussen Almelo en De Haandrik kan niet in de grondwaterstandmetingen in 2011 en 2012 worden teruggevonden. Om de relatie tussen de stijging van de grondwaterstand en de baggerwerkzaamheden nader te onderzoeken zijn, vanwege de beperkte beschikbaarheid van deze metingen, daarom ook grondwaterberekeningen uitgevoerd. Uit de combinatie van grondwaterberekeningen en metingen blijkt dat de grondwaterstand lokaal en kortdurend gestegen kan zijn tot het niveau dat dit een risico op schade geeft.

Ongelijkmatige zettingen door de baggerwerkzaamheden

Er zijn berekeningen gemaakt naar de invloed van de grondwaterstandverhoging op ongelijkmatige zettingen van een fundering op poeren. Uit de berekeningen blijkt dat een relevante stijging van de grondwaterstand bij zo'n fundering in bepaalde gevallen kan leiden tot zodanige ongelijkmatige zakkingen dat schade waarschijnlijk is. Ook blijkt dat panden met een strokenfundering niet gevoelig zijn voor verhoging van de grondwaterstand en dat er voor deze panden geen verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade.

Het werkelijke belastingniveau en draagvermogen van de poeren en de stijging van de grondwaterstand dienen per pand te worden vastgesteld om in geval van geconstateerde schade de relatie met de werkzaamheden vast te stellen. Het is niet mogelijk om een gebiedsbrede relatie te geven tussen de stijging van de grondwaterstand door het baggeren en de ongelijkmatige zettingen.

Wateroverlast door de baggerwerkzaamheden

Door het baggeren van de sliblaag op de bodem van het kanaal kan bij alle panden in de directe omgeving van het kanaal een kleine stijging van de grondwaterstand zijn voorgekomen gedurende een periode van hooguit enkele dagen. In natte perioden kan deze stijging geleid hebben tot een tijdelijke toename van de wateroverlast.

Er zijn geen schademeldingen die wijzen op opbarsten van de keldervloer en schade aan de afdichting van de kruipruimte.

Vervorming van damwanden als gevolg van de baggerwerkzaamheden

Bij het baggeren kan het weghalen van teveel materiaal aan de voet van de damwanden in beginsel leiden tot vervormingen van deze damwanden. Lekkage door spleten tussen de damwandplanken van een vervormde damwand kan leiden tot een stijging van de

grondwaterstand ter plaatse van de panden. De stijging is er zolang het lek niet wordt gedicht. De relaties tussen een stijging van het grondwater en ongelijkmatige zettingen en wateroverlast zijn hiervoor beschreven.

Andere schademechanismen door vervorming van de damwand zijn niet waarschijnlijk.

Trillingen

Uit metingen blijkt dat trillingen van zwaar wegverkeer voelbaar zijn in de panden maar dat het niveau van de trillingen volgens de gangbare richtlijn acceptabel wordt geacht. Daar waar metingen zijn uitgevoerd blijkt niet dat er sprake is van overschrijding van de grenswaarden voor schade volgens de vigerende richtlijn.

Het uitgevoerde onderzoek toont aan dat de trillingen als gevolg van scheepvaart klein zijn. Uit de meetcampagne blijkt dat de grenswaarde voor schade nergens is overschreden. Het is niet waarschijnlijk dat er schade is veroorzaakt door de trillingen als gevolg van de scheepvaart.

Er is een beoordeling uitgevoerd van mogelijke schade door de brugsluitingen tijdens het niet goed functioneren van het besturingssysteem. De beoordeling geeft aan dat de trillingen door ongecontroleerde brugsluitingen waarschijnlijk geen schade hebben veroorzaakt. De pandopnamen geven aan dat er geen schade als gevolg van trillingen is waargenomen.

Tijdens het installeren van de damwanden en boordvoorziening in 2011 en 2012 zijn metingen uitgevoerd. Hieruit blijkt dat tijdens het installeren van de damwanden en de ankers de grenswaarden uit de SBR richtlijn overschreden zijn, waardoor bij een deel van de nabijgelegen panden schade zal zijn ontstaan. Dit komt overeen met de constatering van TNO dat een deel van de gevonden schade waarschijnlijk is te relateren aan trillingen.

Ongelijkmatige zettingen door installatie van klapankers

Ongeveer 50 panden in het gebied staan in het invloedsgebied van de klapankers die zijn gebruikt om damwanden te verankeren. De kans dat daadwerkelijk schade is opgetreden door zakking als gevolg van installatie van deze ankers is reëel, maar dient per pand te worden vastgesteld.

Ongelijkmatige zettingen door werkzaamheden aan de wegen

Van werkzaamheden aan de N750 en de overige parallelwegen is het niet waarschijnlijk dat deze schade hebben veroorzaakt aan de fundering van de panden.

Verzakking van de kruipruimtevloer

Verzakking van de kruipruimtevloer is waarschijnlijk het gevolg van het oxideren van veen. Dit is een natuurlijk proces en heeft geen relatie tot de werkzaamheden aan het kanaal.

Gebiedsbrede consequenties

Uit het onderzoek blijkt dat relaties gelegd kunnen worden tussen de uitgevoerde werkzaamheden aan het kanaal en de geconstateerde schadebeelden. Specifieke omstandigheden zijn echter bepalend voor de lokale relatie tussen de mogelijke oorzaken en schades. Het is niet mogelijk om met de resultaten van dit onderzoek voor alle schadeoorzaken een één-op-één vertaling te maken naar de schade per pand, en deze schade te specificeren.

Technische verdieping

Vastgestelde schadebeelden

De opname van de schadebeelden heeft bestaan uit een inventarisatie van aanwezige scheuren, lintvoegmetingen en archiefonderzoek. TNO heeft op basis hiervan een analyse gemaakt van de oorzaken van de scheuren in de panden.

In totaal zijn 29 panden onderzocht. De analyse van de relatie met de werkzaamheden is uitgevoerd op 26 van de 29 panden, zijnde de panden die representatief zijn voor woningen. Bij enkele panden is historische informatie over de scheuren beschikbaar van vóór het baggeren.

Uit de onderverdeling van de hoofdoorzaken van de scheuren blijkt:

- Voor 17% van het totaal aantal scheuren, verdeeld over 6 van de 26 panden, geldt dat die scheuren waarschijnlijk gerelateerd zijn aan trillingen.
- Voor 39% van het totaal aantal scheuren, verdeeld over 20 van de 26 panden, geldt dat die scheuren waarschijnlijk zijn ontstaan door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.
- 2 van de 26 panden vertonen scheuren die waarschijnlijk zijn gerelateerd aan trillingen én scheuren die waarschijnlijk zijn ontstaan door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.
- In nagenoeg alle panden is sprake van scheuren die waarschijnlijk niet gerelateerd kunnen worden aan effecten vanuit de ondergrond en daarmee niet gerelateerd kunnen worden aan werkzaamheden in en rond het kanaal. In totaal geldt dit voor 44% van het totaal aantal scheuren.
- In 2 van de 26 panden is er alleen sprake van scheuren die waarschijnlijk niet gerelateerd kunnen worden aan effecten vanuit de ondergrond en daarmee niet gerelateerd kunnen worden aan werkzaamheden in en rond het kanaal.

Bij 10 van de 20 panden met zettingsscheuren is een deel van de scheuren gerelateerd aan uitbreidingen / verbouwingen van het pand. Bij 2 van die 10 panden zijn alle zettingsscheuren waarschijnlijk gerelateerd aan uitbreidingen / verbouwingen.

De panden met een paalfundering of volledige onderkeldering hebben geen of zeer weinig scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen. Zowel de panden met een poerenfundering als de panden met een strokenfundering hebben een groot aantal scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen. Dit geldt ook voor de panden waarvan het funderingstype niet bekend is. Eén pand met een gecombineerde poeren- en strokenfundering heeft geen scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen.

Bij de panden met een significante hoeveelheid zettingsscheuren, geven de lintvoegmetingen aan dat er hoogteverschillen door ongelijkmatige zettingen zijn, variërend van ordegrootte 10 mm over een afstand van 1 à 2 m tot ordegrootte 70 mm over 5 à 10 m.

Relatie tussen werkzaamheden en schadebeelden

Stijging van de grondwaterstand door de baggerwerkzaamheden

Het onderzoek laat geen stijging van de grondwaterstand over langere periodes zien die te wijten zijn aan het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren. De verhoging valt te verklaren door neerslag. Dit is zowel af te leiden uit grondwaterstandmetingen uitgevoerd langs het kanaal tijdens de baggerwerkzaamheden, als uit metingen van regionale meetnetten. Dat betekent dat een stijging van de grondwaterstand door het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren niet uit de metingen kan worden afgeleid. Het is mogelijk dat de metingen niet volledig representatief zijn voor het gehele gebied, of dat door de meetfrequentie,

een keer per dag, een relatief kleine, kortstondige stijging niet is gemeten. Om deze reden zijn grondwaterberekeningen gemaakt om eventuele effecten te onderzoeken. Dit is gedaan voor een locatie bij een prioriteitspand waar voldoende meetpunten aanwezig waren om het model te kalibreren.

De berekeningen benadrukken dat een aanzienlijke grondwaterstijging ter hoogte van de peilbuizen in de metingen zichtbaar had moeten zijn. In de gemeten stijghoogte blijkt het effect van de baggerwerkzaamheden bij het prioriteitspand niet waar te nemen. Dat kan erop duiden dat de bodem van het kanaal na baggeren ter hoogte van die locaties weer zo snel is dichtgeslagen dat er geen meetbare stijging van de grondwaterstand is opgetreden, in ieder geval geen langdurige stijging, of dat de meetfrequentie gedurende deze periode (één meting per dag) te kort is om een tijdelijke stijging van de grondwaterstand op deze locaties aan te tonen. Beide mogelijkheden wijzen in de richting van een zeer tijdelijke stijging van beperkte grootte, die niet valt te onderscheiden van stijgingen die zijn veroorzaakt door neerslag. Ter plekke van de doorgerkende locatie lijkt een stijging van de grondwaterstand als gevolg van het open maken van de kanaalbodem door baggeren, die op 25 m afstand van het kanaal groter is dan ongeveer twee decimeter (en een dubbel zo grote stijging op 8 m van het kanaal) daarom zeer onwaarschijnlijk. Zeker gezien de afwezigheid van een dergelijk signaal in de metingen.

Het is niet uit te sluiten dat baggeren van andere delen van het kanaal, waar mogelijk andere bodem- en drainagecondities gelden of waar een groter traject per dag gebaggerd is, heeft geleid tot iets grotere stijgingen van de grondwaterstand. Op basis van de resultaten van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse kan worden geconcludeerd dat stijging van de grondwaterstand door het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren op andere locaties langs het kanaal maximaal 50% groter kan zijn geweest dan bij het prioriteitspand, tot circa 35 cm.

Er is slechts beperkt vastgelegd waar wanneer gebaggerd is. De gemiddelde baggersnelheid voor de periode 2011 en 2012 bedraagt circa 40 m per dag. De grootste gemiddelde snelheid bedraagt circa 100 m per dag voor de winter van 2014 - 2015. Hoe groter de lengte waarover de sliblaag in een korte tijd verwijderd is, hoe groter de mogelijke stijging. De stijging is het grootst bij de panden die zich het dichtste bij het kanaal bevinden, en waar in de winter met grote snelheid gebaggerd is.

Stijging van de grondwaterstand als gevolg van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren kan alleen tot ongelijkmatige zetting leiden als de grondwaterstand een hoogte bereikt die nog niet eerder is bereikt door bijvoorbeeld neerslag. Dit betekent dat slechts gedurende een beperkte periode van baggerwerkzaamheden en een beperkt aantal locaties de grondwaterstanden mogelijk zijn gestegen tot een niveau waarbij het risico op schade aan funderingen bestaat.

Een lekkende damwand heeft een permanente grondwaterstijging tot gevolg, maar over een veel kleiner gebied direct in de omgeving van het lek. Uit oriënterende modelberekeningen met een lekkage over een breedte van een decimeter blijkt dat de optredende stijging in de orde van enkele decimeters kan liggen.

Doordat de monitoring van grondwaterstanden tijdens het baggeren beperkt was en met de huidige gegevens onbekend is wanneer nabij een specifiek pand is gebaggerd, is het niet mogelijk om de conclusies op pandniveau specifieker te maken.

Ongelijkmatige zettingen door de baggerwerkzaamheden

Er zijn berekeningen gemaakt naar de invloed van de grondwaterstandverhoging door het baggeren op ongelijkmatige zettingen van een fundering op poeren. Uit de berekeningen blijkt dat een stijging van de grondwaterstand bij zo'n fundering in bepaalde gevallen kan leiden tot zodanige ongelijkmatige zakkingen dat schade waarschijnlijk is. Ook blijkt dat panden met een

strokenfundering niet gevoelig zijn voor verhoging van de grondwaterstand en dat er voor deze panden geen verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade.

De kans op schade door het baggeren is afhankelijk van de periode waarin is gebaggerd ter plaatse van de panden. Schade is alleen mogelijk als de grondwaterstand een hoogte bereikt die nog niet eerder is bereikt door bijvoorbeeld neerslag. Als er is gebaggerd in een droge periode is een relatie tussen het baggeren en de waargenomen schade daarom niet waarschijnlijk.

Als in de nabijheid van de panden is gebaggerd in een natte periode is de kans op schade door het baggeren afhankelijk van het funderingstype, de nabijheid van een vervormde damwand met lekkage, de afstand van het pand tot het kanaal. Schade is alleen aannemelijk bij een fundering op poeren, en alleen in geval de marge tussen de belasting op de poeren en de draagkracht van de ondergrond onder de poeren gering is.

De kans op schade dient per pand te worden vastgesteld aan de hand van de daadwerkelijke marge en de mogelijke maximale opgetreden grondwaterstandsverhoging tijdens het baggeren. Het is niet mogelijk om een gebiedsbrede relatie te geven tussen de stijging van de grondwaterstand en de verschilzakking.

Wateroverlast door de baggerwerkzaamheden

Door het baggeren van de sliblaag op de bodem van het kanaal kan bij alle panden in de directe omgeving van het kanaal een kleine stijging van de grondwaterstand zijn voorgekomen gedurende een periode van hooguit enkele dagen. In natte perioden kan deze stijging geleid hebben tot een tijdelijke toename van de wateroverlast.

Er zijn geen schademeldingen die wijzen op opbarsten van de keldervloer en schade aan de afdichting van de kruipruimte.

Vervorming van damwanden als gevolg van de baggerwerkzaamheden

Veel van de betonnen damwanden lijken te zijn vervormd en verschoven richting het kanaal. Het is mogelijk dat bij het baggeren teveel materiaal aan de voet van de damwanden is weggehaald waardoor deze vervormingen van de damwanden zijn ontstaan. Door het ontstaan van spleten tussen de planken van een vervormde damwand kan een stijging van de grondwaterstand ter plaatse van de panden optreden. De stijging is er zolang het lek niet wordt gedicht. De gevolgen van deze grondwaterstandsverhoging voor ongelijkmatige zettingen van de funderingen van de panden en wateroverlast zijn vergelijkbaar met de gevolgen van grondwaterstandsverhoging door het weghalen van de afsluitende sliblaag op de bodem van het kanaal en zijn hiervoor beschreven.

Andere schademechanismen door vervorming van de damwand zijn niet waarschijnlijk.

Trillingen

Rondom het kanaal Almelo – de Haandrik zijn in 2019 en 2020 verschillende trillingsmetingen uitgevoerd. De metingen zijn beschreven en de resultaten geanalyseerd. In totaal zijn in zeven panden metingen verricht om de kans op schade te beoordelen; in vier panden zijn metingen verricht om na te gaan of de trillingen hinderlijk zijn.

Volgens de SBR richtlijn A is er geen schade aan de panden te verwachten als gevolg van de scheepvaart. In de beschouwde panden is ook de kans op schade door wegverkeer klein. De trillingen van het wegverkeer kunnen wel voelbaar zijn. In geen van de panden tonen de metingen een overschrijding van de streefwaarden voor hinder van de SBR richtlijn B. Deze conclusies worden bevestigd door de waarnemingen tot en met 8 maart 2020.

Op basis van de trillingsmetingen tijdens het installeren van de damwanden en boordvoorzieningen in 2011 en 2012 blijkt dat de grenswaarden uit de SBR richtlijn A overschreden zijn. Hierdoor kan schade zijn opgetreden aan nabijgelegen panden.

In 2019 zijn metingen uitgevoerd bij vergelijkbare installatie van damwanden. Uit de metingen is een empirische curve voor de 95% bovengrens van de trillingssnelheid afgeleid. Het blijkt dat de trillingssnelheid bij bebouwing gelegen op een afstand van minder dan 45 m van het kanaal de grenswaarde van de richtlijn overschrijdt. Dit betekent dat er bij deze panden een kans op schade is geweest die varieert van 6% op 10 m afstand tot 1% op 45 m afstand. Pandopnamen zijn noodzakelijk om aan te geven welke panden wel of geen schade hebben ondervonden door de werkzaamheden.

Er is een beoordeling uitgevoerd van mogelijke schade door de brugsluitingen tijdens het niet goed functioneren van het besturingssysteem van de Puntbrug. De beoordeling geeft aan dat de trillingen door ongecontroleerde brugsluitingen waarschijnlijk geen schade hebben veroorzaakt. De pandopnamen geven aan dat er geen schade als gevolg van trillingen is waargenomen.

Ongelijkmatige zettingen door installatie van klapankers

Het installeren van klapankers onder een poerenfundering kan leiden tot ongelijkmatige zettingen. Ongeveer 50 panden in het gebied staan nabij of in de zakkingsstrook van de klapankers. De schadeverwachting voor deze panden is afhankelijk van het type ankers, de precieze locatie van de ankers en het type fundering. Een stroken fundering zal anders reageren op de zakking, maar ook bij dat type is schade als gevolg van het installeren van de ankers niet uit te sluiten. De kans dat daadwerkelijk schade is opgetreden door zakking als gevolg van installatie van deze ankers is reëel, maar dient per pand te worden vastgesteld.

Ongelijkmatige zettingen door werkzaamheden aan de wegen

De zettingen van de funderingen van de panden als gevolg werkzaamheden aan de N750 en de overige parallelwegen langs het kanaal zijn naar verwachting zodanig klein dat het niet waarschijnlijk is dat deze schade hebben veroorzaakt aan de fundering van de panden.

Verzakking van de kruipruimtevloer

Verzakking van de kruipruimtevloer is waarschijnlijk het gevolg van het oxideren van veen. Dit is een natuurlijk proces en heeft geen relatie tot de werkzaamheden aan het kanaal.

Gebiedsbrede consequenties

Uit het onderzoek blijkt dat relaties gelegd kunnen worden tussen de uitgevoerde werkzaamheden aan het kanaal en de geconstateerde schadebeelden. Specifieke omstandigheden zijn echter bepalend voor de lokale relatie tussen de mogelijke oorzaken en schades. Het is niet mogelijk om met de resultaten van dit onderzoek voor alle schadeoorzaken een één-op-één vertaling te maken naar de schade per pand en deze schade te specificeren.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	16
1.1	Kanaal Almelo – de Haandrik: korte beschrijving	16
1.2	Context van het onderzoek	16
1.3	Doelstelling onderzoek	17
1.4	Aanpak onderzoek	18
1.5	Meetcampagnes voor dit onderzoek	22
1.6	Door de provincie aangeleverde gegevens	22
1.7	Satellietmetingen van vervormingen van panden	23
1.8	Leeswijzer	23
2	Algemene gebiedsbeschrijving	25
2.1	Geologie en ondergrond	25
2.2	Hoogteligging van het maaiveld en grondwaterstanden	26
2.3	Panden en funderingen	27
3	Opnamen van schadebeelden per pand	28
3.1	Aanpak	28
3.2	Vooropnamen	28
3.3	Overzicht schadebeelden	28
3.4	Analyse van panden met scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door trillingen	30
3.5	Analyse van panden met scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond	30
3.6	Ontwikkeling scheurvorming in de tijd	31
4	Grondwater modellering en invloed van baggerwerkzaamheden	32
4.1	Context	32
4.2	Aanpak op basis van beschikbare metingen	33
4.2.1	Analyse van gemeten grondwaterstanden gedurende het baggeren	33
4.2.2	Grondwaterstandsmetingen prioriteitspand	37
4.2.3	Conclusies beschikbare metingen grondwaterstand	39
4.3	Modellering grondwaterstand	39
4.3.1	Aanpak modellering	39
4.3.2	Gebruikte bestanden	40
4.3.3	Het MIPWA model als regionale basis	40
4.3.4	Resultaten regionale MIPWA model	42
4.3.5	Opstellen lokaal casus model	45
4.3.5.1	Celgrootte	46
4.3.5.2	Ondergrond en modellagen	46
4.3.5.3	Sloten en drainage	46
4.3.5.4	Grondwateraanvulling, oppervlakte water en modelranden	46
4.3.5.5	Het Kanaal Almelo - de Haandrik	47
4.3.5.6	Damwanden	47
4.4	Gevoeligheidsanalyse en modelkalibratie	48
4.4.1	Gevoeligheidsanalyse lokale model	48
4.4.2	Kalibratie lokale model	53
4.4.3	Lokale model geschikt maken voor tijdsafhankelijke berekeningen	55

4.5	Analyse casus	55
4.5.1	Scenario's voor en direct na het baggeren	55
4.5.2	Effect van verwijderen van de bodemweerstand	57
4.5.3	Verschil in optredend effect tussen zomer en winter situatie	58
4.5.4	Effecten baggeren bij tijdsafhankelijk model	59
4.5.5	Tijdsafhankelijke resultaten met bewegend baggerfront	61
4.5.6	Evaluatie van de verschillen tussen berekeningen en metingen	63
4.6	Samenvatting en conclusies grondwater	64
4.6.1	Bevindingen en conclusies ten aanzien van casus van het prioriteitspand	64
4.6.2	Bevindingen en conclusies ten aanzien van effecten langs het kanaal in de ruimere omgeving van Vroomshoop (circa 3 km vanaf het prioriteitspand, gemeten langs het kanaal)	65
5	Trillingen en veldmetingen	67
5.1	Context	67
5.2	Overzicht gevolgen van trillingen en de beoordeling	67
5.3	Overzicht meetcampagnes	67
5.4	Leeswijzer	68
5.5	Onbemande trillingsmonitoring gedurende één week (mei 2019)	69
5.5.1	Doel van de monitoring	69
5.5.2	Werkwijze en keuze meetpunten	69
5.5.3	Resultaten van de monitoring	71
5.5.4	Beoordeling van het aspect schade	71
5.5.5	Beoordeling van het aspect hinder	74
5.5.6	Conclusie	75
5.6	Bemande trillingsmetingen bij de Puntbrug	76
5.6.1	Aanleiding voor deze metingen	76
5.6.2	Doel van de metingen	76
5.6.3	Werkwijze bij de metingen	76
5.6.4	Resultaten van de meting	77
5.6.5	Rekenmodel voor ongecontroleerde brugsluitingen	78
5.6.6	Conclusie	79
5.7	Bemande metingen prioriteitspand	79
5.7.1	Doel van de meting	79
5.7.2	Werkwijze en keuze meetpunten	79
5.7.3	Selectie van de gebeurtenissen	82
5.7.4	Resultaten bij passerende schepen	83
5.7.4.1	Resultaten van de waterspanningsmeters	83
5.7.4.2	Resultaten van de versnellingsopnemers in de grond	84
5.7.4.3	Resultaten van de trillingsopnemers aan het pand	85
5.7.4.4	Resultaten van de trillingsopnemers in de kelder van het pand	86
5.7.5	Resultaten bij passerende vrachtwagens en trekkers	88
5.7.5.1	Waterspanningen tijdens de vrachtwagenpassages	88
5.7.5.2	Resultaten van de passage van een vrachtwagen	91
5.7.5.3	Resultaten van de passage van een trekker	94
5.7.6	Beoordeling en discussie	97
5.7.6.1	Algemene beoordeling	97
5.7.6.2	Beoordeling volgens de SBR richtlijn A voor schade	99
5.7.6.3	Opmerkingen	101
5.7.6.4	Zettingen door verdichting van zand en dynamische of cyclische waterspanningen	102
5.7.7	Conclusie	103
5.8	Onbemande metingen aan en bij een prioriteitspand gedurende 4 weken	103
5.8.1	Doel van de monitoring	103
5.8.2	Werkwijze van de monitoring	104

5.8.3	Resultaten van de monitoring	105
5.8.3.1	Algemeen	105
5.8.3.2	Analyse opnemer aan de muur: Schade	106
5.8.3.3	Analyse van de opnemers op de vloer: hinder	108
5.8.4	Conclusie	112
5.9	Aanvullende onbemande metingen gedurende drie weken	112
5.9.1	Algemene ervaring	113
5.9.2	Meetpand T1	113
5.9.3	Meetpand T2	113
5.9.4	Meetpand T3	113
5.9.5	Voorlopige conclusie aanvullende trillingsmetingen	114
5.10	Trillingsmonitoring bij intrillen damwanden (2011-2012 en 2018-2019)	114
5.10.1	Beoordeling metingen tijdens uitvoering	114
5.10.1.1	Overzicht beschikbare metingen	114
5.10.1.2	Specifieke beoordeling prioriteitspanden	116
5.10.1.3	Opmerkingen n.a.v. de analyses	118
5.10.1.4	Berekening trillingssterkte tijdens het intrillen van een damwand	118
5.10.1.5	Interpretatie en generalisatie	120
5.10.2	Verwerking metingen 2018 en 2019	120
5.10.3	Beoordeling prioriteitspanden	122
5.10.4	Conclusie	123
5.11	Samenvatting conclusies trillingen	124
6	Zettingen van de panden	126
6.1	Context	126
6.2	Invloed van mogelijke damwandvervorming op naburige bebouwing	126
6.2.1	Situatie	126
6.2.2	Waargenomen vervormingen van de damwanden	127
6.2.3	Verhoging van de grondwaterstand	127
6.2.4	Zettingen door uitspoeling van zand	128
6.2.5	Meezakken van het materiaal achter de vervormende damwand	128
6.2.6	Instabiliteit van de grond achter de damwand in het geval van extreme vervormingen	128
6.2.7	Conclusies	128
6.3	Invloed van de baggerwerkzaamheden op ongelijkmatige zettingen van de panden	128
6.3.1	Effect baggerwerkzaamheden op grondwaterstand	128
6.3.2	Invloed van grondwaterstandverhoging op een poerfundering	129
6.3.3	Invloed van grondwaterstandverhoging op een strokenfundering	131
6.3.4	Historische Informatie prioriteitspanden	131
6.3.5	Conclusies prioriteitspanden	131
6.3.6	Conclusies overige panden in het gebied	131
6.4	Invloed op de grondwaterstand door de aanleg van de zinker bij Geerdijk	132
6.5	Verzakkingen van de kruipruimtevloer en uitspoelen van zand onder de huizen	132
6.6	Indicatie van ongelijke zettingen als gevolg van ingebrachte klapankers	134
6.6.1	Achtergrond van het mechanisme	134
6.6.2	Modellering van de zakkingen	134
6.6.3	Beoordeling van de zakkingen	135
6.6.4	Conclusies voor de prioriteitspanden	135
6.6.5	Positie en invloed klapankers gebiedsbreed	136
6.6.6	Conclusies gebiedsbreed	138
7	Beoordeling potentiële schade oorzaken prioriteitspanden	139
7.1	Inleiding	139
7.2	Invloed van de baggerwerkzaamheden op ongelijkmatige zettingen	139
7.3	Mogelijke waterschade door baggerwerkzaamheden	140

7.4	Invloed van trillingen door zwaar wegtransport	140
7.5	Trillingen als gevolg van de scheepvaart	140
7.6	Disfunctioneren van het sluitmechanisme van de Puntbrug	141
7.7	Intrillen van damwanden en ankers in 2011 en 2012	141
7.8	Invloed van mogelijke damwandvervorming op naburige bebouwing	142
7.9	Invloed van werkzaamheden aan parallelwegen langs het kanaal	142
7.10	Verzakkingen van de kruipruimtevloer en uitspoelen van zand onder de huizen	142
7.11	Ongelijke zettingen als gevolg van ingebrachte ankers	143
7.12	Samenvatting van schadeoorzaken en effecten op de prioriteitspanden	143
8	Beoordeling potentiële schade oorzaken gebiedsbreed	144
8.1	Inleiding	144
8.2	Invloed van de baggerwerkzaamheden op ongelijkmatige zettingen	144
8.3	Mogelijke waterschade door baggerwerkzaamheden	144
8.4	Invloed van trillingen door zwaar wegtransport	144
8.5	Trillingen als gevolg van de scheepvaart	145
8.6	Disfunctioneren van het sluitmechanisme van de Puntbrug	145
8.7	Intrillen van damwanden en ankers 2011 en 2012	145
8.8	Invloed van mogelijke damwandvervorming op naburige bebouwing	145
8.9	Invloed van werkzaamheden aan de parallelwegen langs het kanaal	146
8.10	Verzakkingen van de kruipruimtevloer en uitspoelen van zand onder de huizen	146
8.11	Ongelijke zettingen als gevolg van ingebrachte ankers	146
8.12	Samenvatting van schadeoorzaken en effecten op de overige panden in het gebied	147
9	Referenties	148
A	Fugro rapportage Geotechnisch onderzoek en plaatsen waterspanningsmeters	149
B	Gebiedskarakteristieken: maaiveldhoogte en grondwater	150
C	Analyse van grondwaterstanden zomer 2018	153
D	Resultaten versnellingen prioriteitspand	158
E	Resultaten geselecteerde gebeurtenissen prioriteitspand	159
E.1	Toelichting op de presentatie	159
E.2	Toelichting op de ruis in de meting	159
F	Informatie over trillingsopnemers en trillingsmetingen	160
F.1	Type opnemers	160
F.2	Hoe de signalen worden verwerkt	160
F.3	Kalibratie van de opnemers	161
G	Extreme waarden voor gebeurtenissen	162
H	Trillingen door valgewichtproeven en brugsluitingen	166
H.1	Synchronisatie van de signalen	166
H.2	Meetresultaten van de brugsluitingen	168
H.3	Meetresultaten van de valgewicht proeven	170
H.4	Verdere uitwerking van de trillingen van de brugsluitingen	172
H.5	Model voor ongecontroleerde sluiting van een brug	176
I	Resultaten van de onbemande meting prioriteitspand	178
I.1	Alle resultaten van de opnemers	178

I.2	Presentatie lagere trillingsniveaus	180
J	Maximale trillingssnelheden tijdens de bemande meting bij de Puntbrug	185
J.1	Resultaten meting Puntbrug: passages vrachtwagen	185
J.2	Resultaten meting Puntbrug: passages tractor	186
K	Resultaten meetproef op de Puntbrug	187
L	Rapportage uitwerking vervangende damwanden 2019 11203512-006-GEO	188
M	Rapport Movares trillingen Vroomshoop en Marienberg	189
N	Analyse van de vervorming van een poerfundering door grondwaterstandstijging	190
N.1	Invloed van grondwaterstandverhoging op de panden	190
N.2	Laagopbouw en materiaaleigenschappen	190
N.3	Grondwaterstanden	191
N.4	Fundering	191
N.5	Rekenfasering PLAXIS berekening	192
N.6	Resultaten PLAXIS vervormingsberekening	192
O	Afleiding schadecriterium voor verzakkingen	194
P	Model voor de invloed van de klapankers	197

1 Inleiding

1.1 Kanaal Almelo – de Haandrik: korte beschrijving

Het kanaal Almelo – de Haandrik is gegraven in het midden van de 19e eeuw met als doel de Overijsselse Kanalen van water te voorzien. Het graafwerk ten behoeve van het oorspronkelijke kanaal was in 1856 gereed. Oorspronkelijk is het kanaal een zijtak van het Overijssels kanaal waar deze twee ter hoogte van Vroomshoop met elkaar zijn verbonden. Het kanaal Almelo – de Haandrik begint bij de sluis bij Aadorp en loopt door tot aan de sluis bij de Haandrik.

Via het Twentekanaal is er een verbinding met de grote rivieren van Nederland en de zeehavens in het westen. Bij Daarlerveen is er een aansluiting op het in 1971 gesloten Veenkanaal en bij Vroomshoop op het in 1964 gesloten Overijssels Kanaal. Bij De Haandrik mondt het kanaal uit in de Overijsselse Vecht en sluit via een dubbel sluizencomplex aan op het Coevorden-Vechtkanaal. De totale lengte van het kanaal is 32 kilometer.

1.2 Context van het onderzoek

Sinds eind 2011 zijn er werkzaamheden uitgevoerd langs het Kanaal Almelo – de Haandrik om het kanaal geschikt te maken voor grotere scheepvaart tot 700 ton. Het betreft hier verschillende werkzaamheden aan, langs en in het kanaal zoals aangegeven in onderstaande tabel.

Tabel 1.1 Werkzaamheden die zijn uitgevoerd in het kader van de opwaardering van het kanaal voor 700 ton scheepvaart

Werkzaamheden	Uitvoeringsperiode
Brug Hoogenweg, vernieuwing	december 2011 t/m september 2012
Brug Emtenbroekerdijk, vernieuwing	juni 2012 t/m maart 2013
Brug Bergerheim, vernieuwing	januari 2012 t/m november 2012
Brug Beerzerveld, vernieuwing	december 2012 t/m oktober 2013
Brug Kloosterdijk, vernieuwing	april 2012 t/m maart 2013
Aanbrengen zinker	november 2014
Groot onderhoud N750	gestart 13 november 2017
Beveiligd ¹ baggeren	oktober 2015 t/m maart 2016
Baggeren	tweede deel van 2011 en het voorjaar van 2012
Realisatie/wijzigingen wachtplaatsen	2 ^{de} deel 2011 en voorjaar 2012
Realiseren van voorzieningen voor scheepvaart, bedrijven en fauna	2 ^{de} deel 2013 en voorjaar 2014
Aanleg van drempels en andere wegaanpassingen	onbekend

De bewoners langs het kanaal hebben sinds de uitvoering van deze werkzaamheden schade aan hun woningen gemeld. Deze schade betreft voornamelijk waterschade in de kelders en scheurvorming in de muren. Bij de start van de werkzaamheden eind 2011 is er hoofdzakelijk trillingsschade ondervonden als gevolg van de aanleg van de wachtplaatsen en vernieuwing van de bruggen. Deze schades zijn afgewikkeld.

¹ Beveiligd betekent hier baggeren met maatregelen tegen niet-gesprongen explosieven.

Medio 2018 is de provincie Overijssel geconfronteerd met een forse toename van het aantal schademeldingen. Tot medio september 2019 betrof het circa 250 schade meldingen. De Provincie Overijssel heeft als gevolg van de schademeldingen Deltares gevraagd om een onderzoek in te stellen naar de relatie tussen deze schade en de werkzaamheden. De Provincie heeft TNO gevraagd een onderzoek te doen naar de schadebeelden in 29 panden.

1.3 Doelstelling onderzoek

Wanneer werkzaamheden worden uitgevoerd op of in de grond kan dit leiden tot veranderingen in de ondergrond binnen een bepaald invloedsgebied. Deze veranderingen kunnen zijn dat er zettingen optreden en/of het grondwaterregime wordt verstoord. Deze effecten kunnen tijdelijk zijn of nog over een langere periode doorzetten. De effecten kunnen tot beschadiging van panden leiden. Het al dan niet ontstaan van schade door de genoemde werkzaamheden is enerzijds afhankelijk van de grootte van de verandering van het grondwaterregime of van de trillingen, type ondergrond, grootte van de veranderingen in de ondergrond, en anderzijds het type pand en de fundering.

De onderzoeksdoelstellingen voor dit onderzoek zijn:

- Het vaststellen van mogelijke relaties tussen de schadebeelden van de panden en percelen langs het kanaal en de werkzaamheden aan het kanaal.
- Daar waar meerdere relaties te identificeren zijn tussen schade en werkzaamheden, het trachten te bepalen in welke mate de verschillende werkzaamheden hebben bijgedragen aan de schade en waar zij elkaar hebben versterkt.

1.4 Aanpak onderzoek

Het onderzoek is gebaseerd op de inventarisatie van de schadebeelden, analyse van beschikbare of uitgevoerde trillings-, en grondwaterstandsmetingen en een set gegevens van de Provincie Overijssel. Op basis hiervan zijn berekeningen en analyses uitgevoerd om de relatie te onderzoeken tussen de geconstateerde schadebeelden en de uitgevoerde werkzaamheden. Het onderzoek spitst zich toe op de relatie tussen de werkzaamheden en een aantal geïdentificeerde oorzaken die mede zijn geïdentificeerd mede door in nauw overleg met de omwonenden zijn aangegeven.

Het onderzoek is uitgevoerd tussen februari 15 maart 2019 en 17 maart 2020. Het onderzoek baseert zich op gegevens die tot 9 maart 2020 zijn ingewonnen.

Het onderzoek gaat in op de oorzaak van de schade in het gehele gebied langs het kanaal. Het gaat overeenkomstig de opdracht, nog niet in op de gevolgen voor iedere woningeigenaar afzonderlijk.

Gezien het grote aantal schademeldingen is overeengekomen eerst 29 panden te onderzoeken, de zogeheten prioriteitspanden. De metingen en analyses voor deze panden zijn de basis voor de gebiedsbrede conclusies.

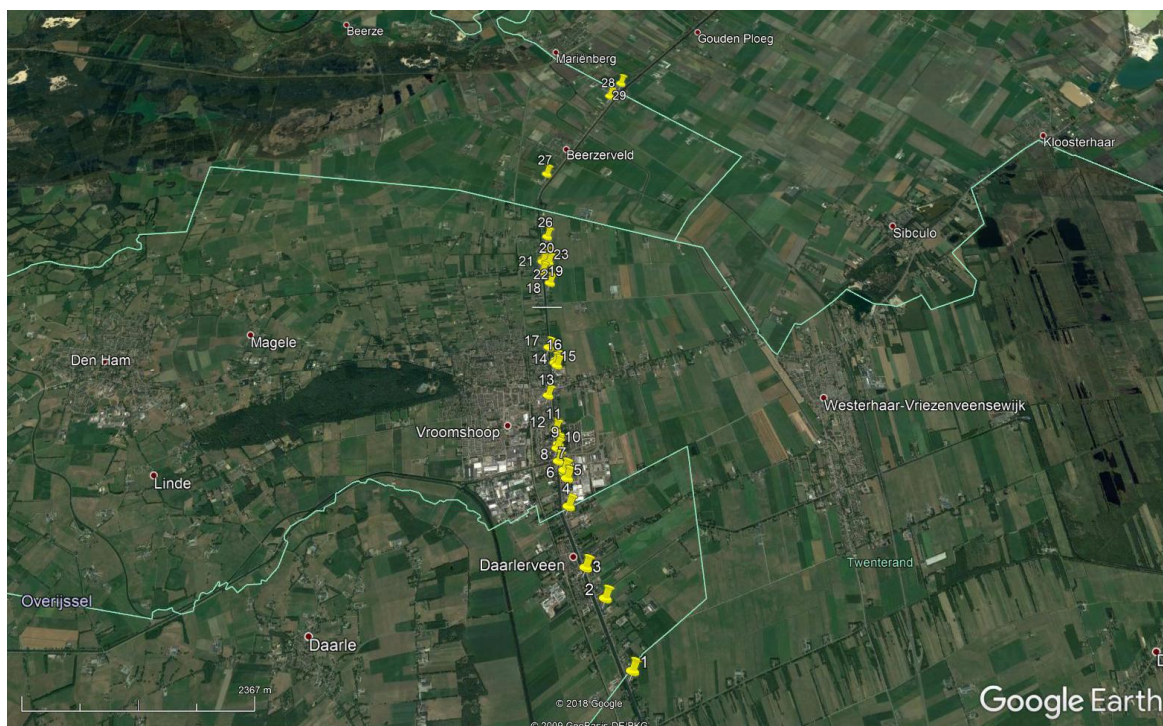
De 29 gekozen panden zijn aangedragen door de klankbordgroep van bewoners in samenspraak met de Provincie en zijn gegeven in de volgende tabel. Omwille van de privacy van de bewoners zijn de daadwerkelijke adressen hier niet gegeven en zijn de panden genummerd 1 tot en met 29. Deze getallen zijn de nummers van de TNO cases en hebben geen relatie met het adres. De laatste 3 kolommen geven aan welke werkzaamheden er zijn uitgevoerd in het kader van de opwaardering van het kanaal en de kortste afstand van deze werkzaamheden tot het betreffende pand.

Tabel 1.2 Overzicht van de prioriteitspanden in het onderzoek. Omwille van de privacy van de bewoners zijn de adressen van de panden hier niet opgenomen

Pand nr.	Zijde	Afstand kanaal tot voorgevel [m]	Werkzaamheden nabij pand behalve baggeren	Details/opmerkingen werkzaamheden behalve baggeren	Kortste afstand pand en werkzaamheden [m]
1	West	73	Geen		n.v.t.
2	West	18	Geen		n.v.t.
3	West	18	Geen		n.v.t.
4	West	18	Geen	Klappen van Brug veroorzaakte voelbare trillingen	n.v.t.
5	West	11	Geen	Damwanden tijdelijke vrijstaande bouwkuisen rond kelder(westzijde) en aanbrug (oostzijde):definitieve damwanden: beschoeiing (verankerd), en kwelschermen	13 m vanaf kanaal zijde waar brug is aangepast
6	West	23	Geen		n.v.t.
7	West	28	Wachtplaats aan de oostzijde Boordvoorziening aan de westzijde	<u>Wachtplaats:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lengte 6m, verankerd, wand ankers lang 15m, 25grd, 58st: <u>Ankers bolders: L=12 en 15m resp35 en 25 graden Tekening 111080-1-4-W717</u> <u>Boordvoorziening: nieuwe stalen damwand PAU 2260, lang 7m, nieuwe ankers, lang 15m, 25 graden 94 st</u>	Wachtplaats: 53; BV:29

Pand nr.	Zijde	Afstand kanaal tot voorgevel [m]	Werkzaamheden nabij pand behalve baggeren	Details/opmerkingen werkzaamheden behalve baggeren	Kortste afstand pand en werkzaamheden [m]
8	West	15	Wachtplaats aan de oostzijde Boordvoorziening aan de westzijde	<u>Wachtplaats:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lengte 6 m, verankerd, wand ankers lang 15 m, 25 graden, 58 st <u>Ankers bolders:</u> L=12 en 15 m resp. 35 en 25 graden <u>Tekening 111080-1-4-W717</u> <u>Boordvoorziening:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lang 7 m, nieuwe ankers, lang 15 m, 25 graden 94 st	Wachtplaats: 76; BV: 38
9	West	15	Wachtplaats aan de oostzijde Boordvoorziening aan de westzijde	<u>Wachtplaats:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lengte 6 m, verankerd, wand ankers lang 15 m, 25 graden, 58 st <u>Ankers bolders:</u> L=12 en 15 m resp. 35 en 25 graden <u>Tekening 111080-1-4-W717</u> <u>Boordvoorziening:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lang 7 m, nieuwe ankers, lang 15 m, 25 graden 94 st	Wachtplaats: 86; BV: 48
10	West	20	Wachtplaats aan de oostzijde Boordvoorziening aan de westzijde	<u>Wachtplaats:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lengte 6 m, verankerd, wand ankers lang 15 m, 25 graden, 58 st <u>Ankers bolders:</u> L=12 en 15 m resp. 35 en 25 graden <u>Tekening 111080-1-4-W717</u> <u>Boordvoorziening:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lang 7 m, nieuwe ankers, lang 15 m, 25 graden 94 st	Wachtplaats: 114; BV: 76m
11	West	18	Geen	Klappen van Brug veroorzaakte voelbare trillingen	22,5 tot aan brug
12	Oost	13	Geen		n.v.t.
13	Oost	9	Geen		n.v.t.
14	Oost	12	Geen		n.v.t.
15	Oost	16	Wachtplaats aan de oostzijde Boordvoorziening aan de westzijde	<u>Wachtplaats:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lengte 6 m, verankerd, wand ankers lang 15 m, 25 graden, 58 st <u>Ankers bolders:</u> L=12 en 15 m resp. 35 en 25 graden <u>Tekening 111080-1-4-W717</u> <u>Boordvoorziening:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lang 7 m, nieuwe ankers, lang 15 m, 25 graden 94 st	Wachtplaats: 86; BV: 46
16	Oost	18	Wachtplaats aan de oostzijde Boordvoorziening aan de westzijde	<u>Wachtplaats:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lengte 6 m, verankerd, wand ankers lang 15 m, 25 graden, 58 st <u>Ankers bolders:</u> L=12 en 15 m resp. 35 en 25 graden <u>Tekening 111080-1-4-W717</u> <u>Boordvoorziening:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lang 7 m, nieuwe ankers, lang 15 m, 25 graden 94 st	Wachtplaats: 49; BV: 42
17	Oost	17	Wachtplaats aan de oostzijde Boordvoorziening aan de westzijde	<u>Wachtplaats:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lengte 6 m, verankerd, wand ankers lang 15 m, 25 graden, 58 st <u>Ankers bolders:</u> L=12 en 15 m resp. 35 en 25 graden <u>Tekening 111080-1-4-W717</u> <u>Boordvoorziening:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lang 7 m, nieuwe ankers, lang 15 m, 25 graden 94 st	Wachtplaats: 72; BV: 56
18	Oost	20	Wachtplaats aan westzijde Boordvoorziening aan de oostzijde	<u>Wachtplaats:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lengte 6 m, verankerd, wand ankers lang 12 m, 8, 54 st <u>Ankers bolders:</u> L=12 en 15 m resp. 35 en 25 graden (8 om 8). <u>Tekening 111080-1-5-W717</u> <u>Boordvoorziening:</u> nieuwe stalen damwand PAU 2260, lang 6 m, nieuwe ankers, lang 12 m, 30 graden 84 st	Wachtplaats: 58; BV: 95

Pand nr.	Zijde	Afstand kanaal tot voorgevel [m]	Werkzaamheden nabij pand behalve baggeren	Details/opmerkingen werkzaamheden behalve baggeren	Kortste afstand pand en werkzaamheden [m]
19	Oost	25	Wachtplaats aan westzijde Boordvoorziening aan de oostzijde	Wachtplaats: nieuwe stalen damwand PAU 2260, lengte 6 m, verankerd, wand ankers lang 12 m, 8, 54st: Ankers bolders: L=12 en 15 m resp. 35 en 25 graden (8 om 8). Tekening 111080-1-5-W717 Boordvoorziening: nieuwe stalen damwand PAU 2260, lang 6 m, nieuwe ankers lang 12 m, 30 graden 84 st	Wachtplaats: 74; BV: 28
20	West	10	Boordvoorziening aan westzijde	Bestaande betonnen wand behouden, nieuwe ankers lang 10 m, hoek 35 graden, 36 stuks	10
21	Oost	13	Boordvoorziening 2 aan westzijde	Bestaande betonnen wand behouden, nieuwe ankers lang 10 m, hoek 35 graden, 36 stuks	46
22	Oost	29	Boordvoorziening 2 aan westzijde	Bestaande betonnen wand behouden, nieuwe ankers lang 10 m, hoek 35 graden, 36 stuks	101
23	West	29	Geen		n.v.t.
24	West	23	Geen		n.v.t.
25	Oost	13	Geen		n.v.t.
26	Oost	24	Geen		n.v.t.
27	West	11,5	Wachtplaats aan westzijde	<u>Deel 1:</u> Nieuwe stalen damwand PAU 2260, lengte 6 m, verankerd, wand ankers L=12 m, hoek 20 graden. Ankers Bolders ankers L=9, 28 graden, 2 ankers L=12, 18 graden <u>Deel 2:</u> Bestaande stalen damwand behouden t.p.v. bolders ankers: 6 ankers L=9 m, 28 graden, 6 ankers L=12m, 18graden <u>Deel 3:</u> Nieuwe stalen damwand PAU 2260, L=6, verankerd, wand ankers L=12, 20 graden	11
28	Oost	14,5	Geen		n.v.t.
29	Oost	12,5	Boordvoorziening aan westzijde	Bestaande betonnen wand behouden, nieuwe ankers lang 10m, hoek 35 graden, 36 stuks	38,5



Figuur 1.1 Overzicht van de spreiding van de prioriteitspanden in het onderzoek. De nummering is oplopend van zuid naar noord, en heeft geen relatie met het pandnummer

Uit de informatieavonden en de gesprekken tussen de bewoners en zaakbehartigers van de Provincie zijn de volgende mogelijke externe oorzaken (bronnen buiten de woning zelf) voor de schade geïdentificeerd:

- Baggerwerkzaamheden in het kanaal.
- Zwaarder transport op de weg langs het kanaal.
- Meer en zwaardere scheepvaart in het kanaal.
- Inbrengen van nieuwe damwanden en ankers.
- Het mogelijk deformerende/bezweigen van de damwanden.
- Aanbrengen en onderhoud aan drempels in de weg langs het kanaal.
- Het verwijderen van damwanden en ankers.
- Ongecontroleerd (hard) sluiten van de brug (Vroomshoop).
- Verzwaring/groot onderhoud aan N750.
- Aanbrengen van een zinker in het kanaal.

Deltares heeft de invloed van de bovengenoemde aspecten op en in de ondergrond en hun mogelijke verband met de schadebeelden door middel van metingen, berekeningen en modelleringen geanalyseerd.

Naast de hierboven genoemde aspecten die veranderingen in de ondergrond hebben kunnen veroorzaken heeft TNO voor de 29 prioriteitspanden, waar schade is gemeld, pandopnamen geanalyseerd. De resultaten van dit onderdeel zijn terug te vinden in hoofdstuk 3.

De pandopnamen en de Deltares analyses zijn gecombineerd om een uitspraak te doen over het mogelijke causale verband tussen de schadebeelden en de werkzaamheden in en langs het kanaal.

1.5 Meetcampagnes voor dit onderzoek

De volgende meetcampagnes zijn uitgevoerd:

- Onbemande trillingsmetingen aan een selectie panden representatief voor de oudere, op staal gefundeerde panden langs het kanaal en twee nieuwe appartementencomplexen nabij de Puntbrug gedurende 1 week.
- Bemande trillingsmetingen langs de nieuwe appartementencomplexen nabij de Puntbrug gedurende 1 dag.
- Bemande trillingsmetingen en waterspanningsmetingen aan een pand en in de ondergrond ter hoogte van een prioriteitspand.
- Onbemande trillingsmetingen en waterspanningsmetingen aan een prioriteitspand en in de ondergrond ter hoogte van het pand gedurende 4 weken.
- Aanvullende onbemande trillingsmetingen in februari en maart 2020 ter hoogte van de twee prioriteitspanden en een niet-prioriteitspand.

Dit onderzoek is uitgevoerd op basis van data die zijn ingewonnen tot en met 8 maart 2020. Gegevens die na deze datum beschikbaar zijn gekomen, of nog worden ingewonnen zijn niet meegenomen in dit onderzoek.

Voor de beschouwing van de trillingen bij het plaatsen van damwanden en van ankers is gebruik gemaakt van de trillingsmetingen die tijdens de werkzaamheden in 2011-2012 zijn uitgevoerd. Dit zijn de (beperkte) metingen die zijn uitgevoerd bij het inbrengen van de damwanden voor de opwaardering van het kanaal, en trillingsmetingen die eind 2019 zijn uitgevoerd bij het inbrengen van nieuwe damwanden ter vervanging van in zeer slechte staat verkerende oude damwanden.

Naast deze meetcampagnes gericht op trillingsbronnen en grondwaterstandsmetingen zijn er ook een aantal sonderingen en één boring uitgevoerd bij een prioriteitspand. Dit grondonderzoek is uitgevoerd door Fugro en beschreven in de feitelijke rapportage met kenmerk 1419-0082-000, versie: 2.0, d.d. 02 juli 2019 en is bijgesloten in bijlage A.

1.6 Door de provincie aangeleverde gegevens

De Provincie heeft de volgende gegevens aangeleverd (niet limitatief):

- Overzichtstekening van activiteiten en schademeldingen.
- Tabel van schademeldingen.
- Korte beschrijving van de opwaardering van het Kanaal.
- Meldingsformulieren.
- Bestekken van het Baggeren.
- Uitpeilingen kanaal profielen van 1998.
- Het kwelonderzoek uitgevoerd door Royal Haskoning in 2010.
- Kwelonderzoek specifiek nabij Daarlerveen.
- Documenten betreffende de bodemafdichting Daarlerveen.
- Peildata baggeren t.b.v. de opwaardering.
- Werkplannen baggeren.
- Verslagen bouwvergaderingen baggeren.
- Monitoring tijdens baggeren.
- Wachtplaatsen bestek.
- Trillingsmetingen wachtplaatsen 2011-2012.
- Trillingsmetingen damwanden 2018-2019.
- Voor- en na opnames.
- Tekeningen en grondwateranalyse met betrekking tot de zinker te Geerdijk.
- Grondonderzoeken Mos 1995.

- Documenten betreffende de vervanging van de brug Kloosterdijk.
- Documenten met betrekking tot de werkzaamheden aan de N750.

Verder dient opgemerkt te worden dat de Provincie geen historische informatie beschikbaar heeft gesteld over de prioriteitspanden, zoals bijvoorbeeld in het verleden uitgevoerde pandopnamen. De Provincie heeft de pandeigenaren zelf de keus gegeven om de eventueel aanwezige historische informatie beschikbaar te stellen of niet. Van één prioriteitspand is een vooropname beschikbaar gesteld. Ook is waar mogelijk gebruik gemaakt van historische beelden in Google StreetView.

Tevens zijn er gegevens gebruikt uit bestaande openbare databases:

- MIPWA model, versie 3.0.
- Algemeen Hoogtebestand Nederland versie 2.
- Geologische boorprofielen uit Dinoloket (mei 2019).
- Locaties stalen en betonnen damwanden langs het kanaal ingemeten door RHDHV.
- Grondwaterstanden en stijghoogten uit Dinoloket, databases provincie Overijssel en waterschap Vechtstromen en lokale monitoring tijdens en na het baggeren.

1.7 Satellietmetingen van vervormingen van panden

InSAR (Interferometric Synthetic-Aperture Radar) satellietmetingen maken het mogelijk de verplaatsingen van objecten met hoge nauwkeurigheid te meten. InSAR is gebaseerd op een radar signaal dat vanuit de satelliet wordt verstuurd en reflecteert op objecten zoals huizen.

Voor het gebied zijn in de tijd overlappende reeksen metingen beschikbaar van ENVISAT van december 2003 tot en met september 2010, RADARSAT-2 (standard 3 modus) van juni 2010 tot en met november 2016 en RADARSAT-2 (extra fine modus) van april 2015 tot en met december 2018.

Deze metingen zijn op bruikbaarheid beoordeeld. De conclusie is dat de metingen teveel ruis bevatten om duidelijk trends in deformatie weer te geven. Om deze reden zijn de metingen op dit moment niet verder geanalyseerd. Bij verdere analyse van individuele panden kan nader onderzoek met deze methode wellicht inzicht bieden in de zakking of relatieve zakking van de panden. Het leggen van causale verbanden tussen InSAR metingen en schade is naar verwachting niet mogelijk omdat dan meerdere goede reflectoren per pand beschikbaar moeten, hetgeen zelden het geval is.

1.8 Leeswijzer

Dit hoofdstuk geeft een korte schets van de context en achtergrond van het onderzoek, de hoofddoelstellingen en de gewenste mate van detail van het onderzoek. Hoofdstuk 2 geeft een algemene gebiedsbeschrijving.

Hoofdstuk 3 geeft een samenvatting en eerste analyse van de pandopnamen. De pandopnamen zijn geïntegreerd in de analyses in de hoofdstukken 4, 5 en 6. Hoofdstuk 4 gaat in op de grondwatermodellering en de invloed van de baggerwerkzaamheden op het grondwaterregime. Hoofdstuk 5 behandelt het aspect trillingen als gevolg van het inbrengen van damwanden en ankers, weg- en scheepvaartverkeer en het sluiten van bruggen. Hoofdstuk 6 analyseert een aantal mechanismen die van invloed zijn op de zettingen van de panden, waaronder het baggeren.

Hoofdstuk 7 geeft het verband tussen de schademechanismen en de pandopnamen, en geeft conclusies over de invloed van de werkzaamheden op de prioriteitspanden. Hoofdstuk 8 geeft het gebiedsbrede verband tussen de schademechanismen en schade aan panden, voor het gebied buiten de prioriteitspanden.

2 Algemene gebiedsbeschrijving

2.1 Geologie en ondergrond

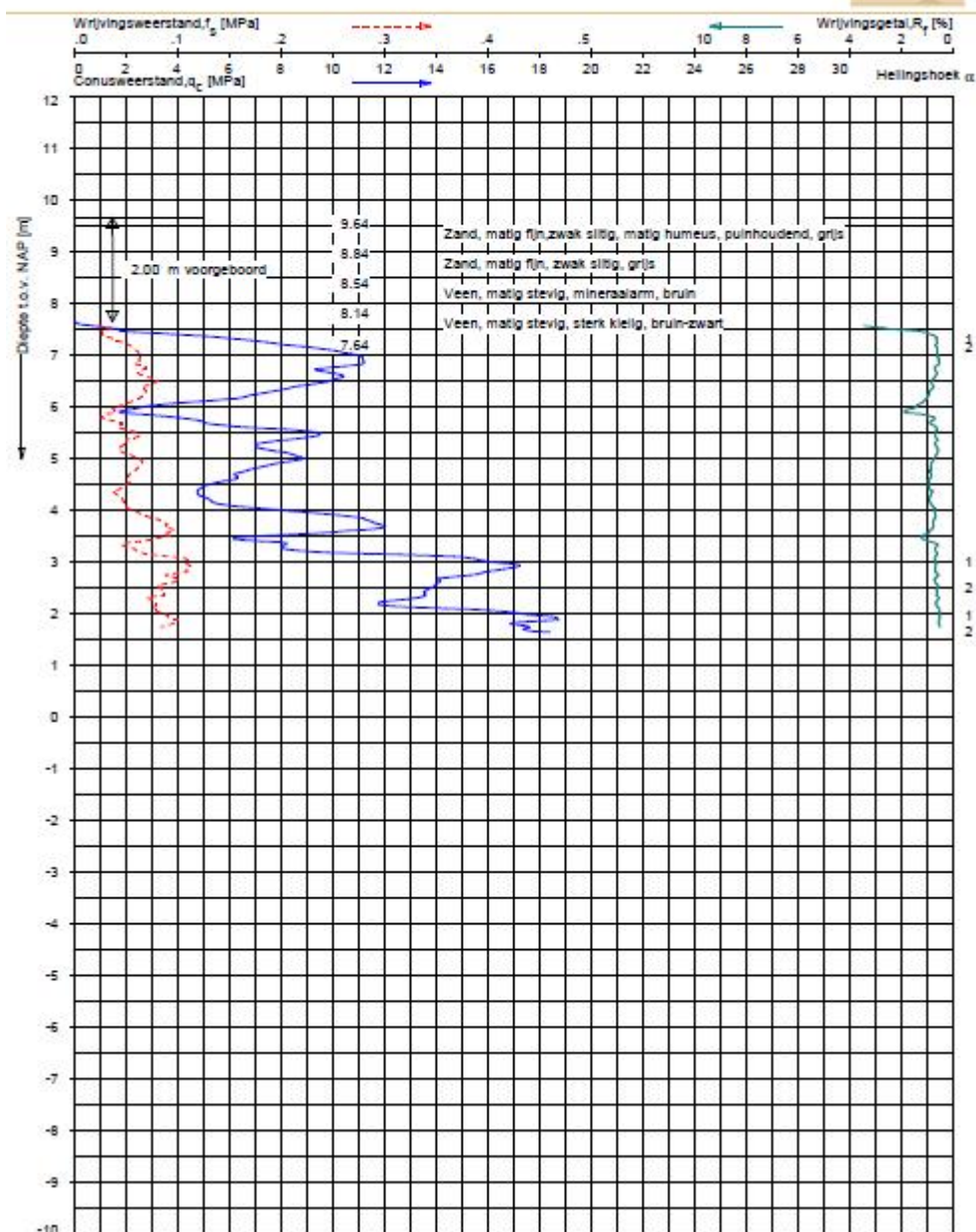
Geologisch kan de ondergrond langs het kanaal Almelo – de Haandrik op basis van de geologie in ruwweg twee delen worden opgedeeld. Het traject van Almelo tot Vroomshoop behoort bij het Twents plateau met de glaciale afzettingen van de formatie van Drenthe relatief dicht onder het oppervlakte. Op het traject van Vroomshoop tot de Haandrik bevinden zich de afzettingen van Kreftenheye van fluviatiele oorsprong.

Hoewel er lokale verschillen zijn tussen beide delen, is de grondopbouw over de eerste 10 meter toch zeer overeenkomstig.

Het maaiveld langs het kanaal ligt tussen de NAP +10 m en NAP +9 m. De eerste twee meter vanaf maaiveld bestaan veelal uit antropogeen zand en natuurlijke veen afzettingen. Onder de grens van circa NAP +8 m a NAP +7 m wordt langs het gehele traject een afzetting van matig fijn zand en leem aangetroffen. Het vaste grovere zand wordt doorgaans aangetroffen onder het niveau van NAP +5 m tot NAP +3 m. In veel sonderingen en boringen wordt ook een duidelijke leemlaag aangetroffen met een lage conusweerstand tussen NAP +6 m en NAP +5 m. Het kanaalpeil ligt op ongeveer NAP +9,1 m.

Boringen en sonderingen geven aan dat er nauwelijks slappe samendrukbare lagen in de ondergrond zijn dieper dan 2 m beneden maaiveld. Dit is eveneens het niveau tot waar doorgaans de kelder is uitgegraven en de diepte van de fundering van de panden zich bevinden (zie ook paragraaf 2.3).

De onderstaande figuur geeft een indruk van een typische sondering uitgevoerd langs het kanaal Almelo – de Haandrik. Deze specifieke sondering is uitgevoerd langs het pand langs het kanaal ter hoogte van een prioriteitspand en is vergelijkbaar met sonderingen langs het gehele kanaal in termen van de dikte van de samendrukbare bovenlaag en de diepteligging van het eerste zandpakket.



Figuur 2.1 Typische sondering uitgevoerd langs het kanaal Almelo – de Haandrik

2.2 Hoogteligging van het maaiveld en grondwaterstanden

Deze paragraaf beschrijft de hoogteligging van het maaiveld en het grondwaterverloop langs het kanaal.

Bijlage B geeft ter illustratie drie figuren die het gebied langs de gehele kaart illustreren. De eerste figuur geeft de maaiveldhoogte weer (op basis van het Actueel Hoogtebestand Nederland), de tweede het verloop van grondwaterstanden op basis van MIPWA3 en de derde het verschil tussen de hoogteligging van het maaiveld en het kanaalpeil.

In het gebied aan de westzijde van het kanaal tussen Vriezenveen en Bergentheim ligt het maaiveld lager dan het kanaalpeil. De keldervloeren liggen doorgaans dicht tegen of onder de

grondwaterstand in het natte seizoen. Aan de oostzijde van het kanaal is het gebied waar het maaiveld lager ligt dan het kanaalpeil iets kleiner en loopt ongeveer van Daarlerveen tot Bergentheim. Het hoogteverschil ter hoogte van de panden en achtertuinen die direct aan het kanaal liggen is aan de oostzijde doorgaans minder, circa 1 m versus 2 m aan de westzijde.

Langs zowel de west- als de oostzijde is een vrij dicht ontwateringsstelsel aanwezig. Dit is echter minder dicht in de bebouwde gebieden zoals Vroomshoop. Ook worden deze watergangen (in vele gevallen kleine slootjes met een diepte van circa 0,5 m onder maaiveld) veelal niet actief door het waterschap onderhouden. Ook zijn vele sterk begroeid wat de afwatering niet ten goede komt.

2.3 Panden en funderingen

Van oorsprong beschikken de huizen langs het kanaal over funderingen op staal met gemetselde poeren en soms met funderingsstroken. Bij de meer moderne woningen zijn deze uitgevoerd in beton. Onderstaande foto geeft een idee van dit type oudere gemetselde poeren.



Figuur 2.2 Foto van de doorgaans voorkomende type fundering

De werkwijze met betrekking tot de aanleg van de funderingen zoals begrepen van verschillende bewoners is al decennia feitelijk niet anders en kent twee varianten. Bij de eerste variant worden de slappe samendrukbare lagen afgegraven tot op de diepte waar de eerste draagkrachtige zandlaag wordt aangetroffen. Veelal is dit rond de NAP +7 m à NAP +8 m, circa 2 m onder maaiveld. Op deze eerste laag worden poeren gemetseld of gestort tot aan het oorspronkelijke maaiveld, zoals te zien is in Figuur 2.2. Indien er een kelder is voorzien wordt in dat gedeelte een vloer gestort (of getegeld) en dichtgemetseld. De overige gedeelten buiten het keldergedeelte worden veelal terug gevuld met nog wel vaak een 'kruipruimte'.

Bij de tweede variant wordt het veen niet geheel afgegraven maar worden boorgaten gemaakt tot op het vaste zand die vervolgens met beton (en wapening) worden volgestort. Op de zo ontstane poeren (soms nog met metselwerk op de kop maar niet altijd) worden dan de horizontale dragers aangebracht die de muren (en vloer) van het huis dragen en vervolgens het huis opgetrokken.

3 Opnamen van schadebeelden per pand

3.1 Aanpak

De pandopnamen zijn uitgevoerd en geanalyseerd conform de methodiek die is omschreven in TNO rapport 2011-02980 "Methodiek voor onderzoek naar de oorzaak van gebouwschade - versie 2".

Ten behoeve van het onderzoek heeft Adviesbureau Vermeer, in opdracht van de Provincie, voor elk van de prioriteitspanden een inventarisatie gemaakt van alle aanwezige scheuren in het pand. Tevens zijn, voor zover mogelijk, lintvoeg metingen uitgevoerd en is in het gemeentelijk archief informatie ingewonnen over de wijze van funderen van de panden. De resultaten hiervan zijn gebruikt als onderlegger voor de analyse van de oorzaken van de scheuren in de panden.

Op basis van informatie over het verloop van de (wijde van de) scheuren, de bouwkundige opbouw van de gescheurde bouwdelen en de optredende belastingen in het pand, is vastgesteld of de schade veroorzaakt kan zijn door één of meer van de volgende hoofdeffecten:

- Belastingen (krachtswerking in het pand), waaronder ook de effecten van externe trillingen.
- Verhinderde dan wel opgelegde vervormingen.
- Ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.

In totaal zijn 29 panden onderzocht. Daarvan zijn 3 panden bedrijfspanden die niet representatief zijn voor woningen. De navolgende analyse is uitgevoerd op de overige 26 panden die representatief zijn voor woningen.

De informatie in dit hoofdstuk is vastgesteld in samenwerking met TNO.

3.2 Vooropnamen

Bij enkele panden is historische informatie over een deel van de scheuren beschikbaar. Dit betreft enerzijds informatie uit vóór het baggeren uitgevoerde pandopnamen, beschikbaar gesteld door de eigenaren, en anderzijds informatie uit Google Streetview.

3.3 Overzicht schadebeelden

Deze paragraaf bevat een nadere analyse van de scheuren in de 26 panden die representatief geacht worden voor woningen.

In totaal zijn 1286 scheuren opgenomen en geanalyseerd. Dat is gemiddeld 49 scheuren per pand. Van het totaal aantal scheuren was 60% aan de binnenzijde gesitueerd en 40% aan de buitenzijde.

De effecten van werkzaamheden in en rond het kanaal die schade kunnen geven aan de panden in de omgeving van het kanaal, zijn zettingen van de ondergrond en/of trillingen. Om deze reden is de volgende onderverdeling gemaakt van de oorzaken van de schade:

- Scheuren waarvan het waarschijnlijk is dat die zijn veroorzaakt door trillingen (of waar trillingen waarschijnlijk mede oorzaak zijn).
- Scheuren die gerelateerd kunnen worden aan ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.
- Overige scheuren, die zeer waarschijnlijk niet gerelateerd kunnen worden aan werkzaamheden in en rond het kanaal.



Figuur 3.1 Nadere verdeling van het totaal aantal scheuren over de oorzaken (26 panden die representatief geacht worden voor woningen)

De resultaten van deze onderverdeling van de oorzaken van de scheuren zijn weergegeven in Figuur 3.1. Uit deze figuur blijkt het volgende:

- Voor 17% van het totaal aantal scheuren, verdeeld over 6 van de 26 panden, geldt dat die waarschijnlijk gerelateerd zijn aan trillingen. Voor een deel van die scheuren geldt dat ze waarschijnlijk alleen zijn ontstaan door trillingen. Voor de overige scheuren geldt dat trillingen mogelijk een effect hebben gehad bij het ontstaan en/of vergroten van die scheuren. Deze panden worden verder geanalyseerd in paragraaf 3.4.
- Voor 39% van het totaal aantal scheuren, verdeeld over 20 van de 26 panden, geldt dat die waarschijnlijk zijn ontstaan door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond. Hiervan kan circa een derde deel gerelateerd worden aan uitbreidingen dan wel verbouwingen aan de panden. Deze panden worden verder geanalyseerd in paragraaf 3.5.
- 2 van de 26 panden vertonen scheuren die waarschijnlijk zijn gerelateerd aan trillingen én scheuren die waarschijnlijk zijn ontstaan door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.
- In nagenoeg alle panden is sprake van scheuren die waarschijnlijk niet gerelateerd kunnen worden aan effecten vanuit de ondergrond en daarmee niet gerelateerd kunnen worden aan werkzaamheden in en rond het kanaal. In totaal geldt dit voor 44% van het totaal aantal scheuren.
- In 2 van de 26 panden is er alleen sprake van scheuren die die waarschijnlijk niet gerelateerd kunnen worden aan effecten vanuit de ondergrond en daarmee niet gerelateerd kunnen worden aan werkzaamheden in en rond het kanaal.

In de onderverdeling van het aantal scheuren per oorzaak is geen duidelijk verschil te zien tussen de panden gelegen aan oost- en westzijde van het kanaal.

3.4 Analyse van panden met scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door trillingen

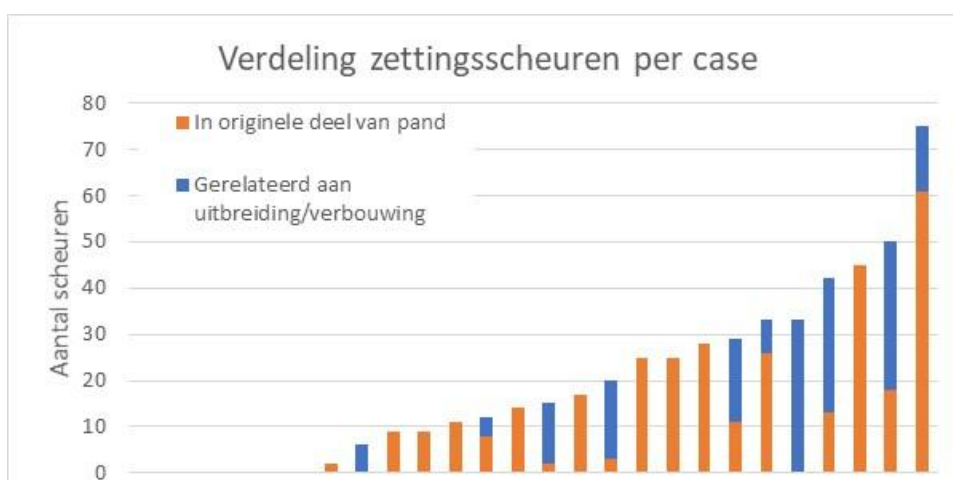
De zes panden met scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door trillingen liggen geconcentreerd langs circa één kilometer van het kanaal.

Eén pand is niet gesitueerd op een locatie waar werkzaamheden voor het kanaal zijn uitgevoerd die trillingen hebben veroorzaakt. Bij dit pand is mogelijk sprake van trillingen door zwaar verkeer.

De overige vijf panden liggen op een afstanden tussen 28 en 76 m vanaf werkzaamheden die trillingen hebben veroorzaakt.

Analyse van panden met scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond

Figuur 3.2 geeft het aantal scheuren per pand dat mogelijk is veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen, opgesplitst in scheuren die zijn gerelateerd aan uitbreidingen/verbouwingen en scheuren in de originele delen van de panden.



Figuur 3.2 Overzicht van het aantal scheuren per pand dat mogelijk is veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen, opgesplitst in scheuren die zijn gerelateerd aan uitbreidingen/verbouwingen en scheuren in de originele delen van de panden

Uit *Figuur 3.2* blijkt dat bij 10 van de 20 panden met zettingsscheuren een deel van de scheuren is gerelateerd aan uitbreidingen/verbouwingen van het pand. Bij 2 van die 10 panden zijn alle zettingsscheuren waarschijnlijk gerelateerd aan uitbreidingen/verbouwingen.

Er is geen relatie tussen het aantal scheuren en de locatie langs het kanaal. Veruit de meeste scheuren zijn aanwezig in oude panden. Het blijkt dat bijna alle beschouwde panden tussen de 10 en 30 m van het kanaal liggen. Binnen deze afstand is er geen relatie tussen het aantal scheuren en de afstand van de voorgevel tot het kanaal.

Tabel 3.1 geeft een overzicht van het gemiddelde aantal scheuren per pand in de originele delen dat mogelijk is veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen, uitgesplitst naar de wijze van funderen.

Tabel 3.1 Gemiddelde aantal scheuren per pand in de originele delen dat mogelijk is veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen, uitgesplitst naar de wijze van funderen

Type fundering	Aantal panden	Gemiddelde aantal scheuren per pand in de originele delen dat mogelijk is veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen
Paalfundering	1	0
Volledig onderkelderd	4	1
Poerenfundering	7	13
Strokenfundering	3	12
Poeren- en strokenfundering	1	0
Onbekend	10	19

Uit Tabel 3.1 blijkt dat van de 16 panden waarvan het funderingstype bekend is, ongeveer de helft een poerenfundering heeft. Van 10 panden is het funderingstype niet bekend.

De panden met een paalfundering of volledige onderkeldering hebben geen of zeer weinig scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen. Zowel de panden met een poerenfundering als de panden met een strokenfundering hebben een groot aantal scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen. Dit geldt ook voor de panden waarvan het funderingstype niet bekend is. Eén pand met een gecombineerde poeren- en strokenfundering heeft geen scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen.

De lintvoegmetingen geven een indruk van de grootte van de ongelijkmatige zettingen die tot scheurvorming hebben geleid. Bij de panden met een significante hoeveelheid zettingsscheuren, geven de lintvoegmetingen aan dat er hoogteverschillen zijn variërend van ordegrootte 10 mm over een afstand van 1 à 2 m tot ordegrootte 70 mm over 5 à 10 m.

3.5 Ontwikkeling scheurvorming in de tijd

Door veel eigenaren is aangegeven dat de scheuren in het verleden zijn gerepareerd en dat de scheuren toch weer zichtbaar zijn geworden. Veelal wordt dan de conclusie getrokken dat het schadeproces doorgaat.

Waarschijnlijk is dit voor het merendeel van de scheuren niet het geval. De reden waarom de meeste scheuren weer “terugkomen” is dat seizoensgebonden vervormingen in de wanden, met name door vocht- en temperatuurvariatie, zich zullen concentreren in de gerepareerde scheuren. Dat zijn namelijk de “zwakke” plekken in de wanden. Doordat die vervormingen zich daar concentreren, scheuren de reparaties, omdat die vrijwel altijd oppervlakkig zijn.

4 Grondwater modellering en invloed van baggerwerkzaamheden

4.1 Context

Situatieschets

Het kanaal Almelo - De Haandrik ligt relatief hoog ten opzichte van zijn directe omgeving. Het waterpeil dat in het kanaal wordt gehandhaafd ligt op ongeveer NAP +9,1 m. De kanaaldijken, met daarop een weg liggen ongeveer een halve meter hoger. De meeste panden die aan de weg liggen hebben ongeveer hetzelfde vloerniveau. Deze meeste panden liggen op 15 m tot 25 m afstand van de oever van het kanaal. Op een enkele plaats is deze afstand kleiner dan 10 m. Op diverse plekken langs het kanaal is de grondwaterstand gemeten tijdens de baggerwerkzaamheden in 2011-2012. Er zijn geen grondwatermetingen beschikbaar voor de baggerwerkzaamheden uitgevoerd in 2015-2016.

In een droge zomerperiode is de gemeten grondwaterstand op 10 m tot 15 m afstand van het kanaal 1,3 tot 1,8 m lager dan het waterpeil in het kanaal. In een natte winterperiode is de hoogste gemeten grondwaterstand in deze meetpunten nog altijd 0,5 tot 1 meter lager dan het waterpeil in het kanaal.

Baggeren kanaalbodem

Het bovenstaand genoemde verval tussen grondwater en kanaalpeil betekent enerzijds dat er potentieel een grote drijvende kracht aanwezig is om water vanuit het kanaal naar het grondwater te infiltreren. Anderzijds duidt het grote verschil tussen gemeten grondwaterstand en kanaalwaterpeil op de aanwezigheid van een grote stromingsweerstand. In deze regio zit die weerstand voornamelijk in de bodem van het kanaal, waar zich een sliblaag heeft opgebouwd. Bij baggeren van de kanaalbodem wordt deze weerstand verlaagd en kan zelfs compleet worden weggehaald. Het baggeren was bedoeld om het kanaal te verdiepen. Daardoor wordt verondersteld dat tijdens het baggeren de complete sliblaag van de bodem is weggehaald.

Dichtslaan kanaalbodem

Resultaat van het baggeren is dat de kanaalbodem wordt geopend en het kanaalwater door de aanwezige grote drijvende kracht met relatief grote snelheid de bodem instroomt. Door het baggeren komt er veel heel fijn zwevend slibmateriaal in het kanaalwater terecht. Dit fijne materiaal wordt met het uitstromende water mee de grond in gezogen, waardoor de relatief grote poriën in de zandbodem snel dichtslibben (Talmon, 2013). Als dit proces al niet tijdens het baggeren zelf optreedt, omdat dan het water door de baggeractiviteiten in turbulentie is, dan gebeurt dat toch zeker als de baggerwerkzaamheden van de werkdag gestopt zijn en het water tot rust komt. De weerstand die hierdoor wordt opgebouwd kan in heel korte tijd enorm oplopen, waardoor de oorspronkelijke situatie met grote verschillen tussen kanaalwaterpeil en grondwaterstand weer hersteld wordt. Voorbeelden hiervan zijn plassen die ontstaan zijn door zand- en grindwinningen als de plas Broekvelden bij Reeuwijk, de Spiegelplas bij de Horstermeerpolder en de plas Het Anker bij Kloosterhaar. In al deze gevallen zijn in heel korte tijd heel grote verschillen ontstaan tussen plaswaterpeil en naastgelegen grondwaterstand. Ook bij de sanering van het Ketelmeer is verstopping in zeer korte tijd opgetreden (De Lange, 2011).

Effecten baggeren

Dit hoofdstuk beschrijft de effecten van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren op de grondwaterstand in de omgeving van het kanaal. Fysieke effecten die mogelijk door de baggerwerkzaamheden kunnen worden veroorzaakt als extra trilling van de bodem, beschadiging oevers en damwanden, en dergelijke worden in dit hoofdstuk niet beschouwd.

Doorgaans kan verwacht worden dat de grondwaterstand langs het kanaal stijgt, als gevolg van het weghalen van de kanaalbodem (weerstand) door het baggeren. Door het snelle dichtslaan van de bodem na het baggeren is deze verhoging van de grondwaterstand doorgaans tijdelijk. Verhoging van de grondwaterstand kan leiden tot twee verschillende problemen.

1. Grondwateroverlast. Daarbij moet worden gedacht aan natte kruipruimtes en langs de muren optrekkend vocht. De kans dat dit optreedt is het grootst in natte perioden waardoor de grondwaterstand al hoger is dan normaal. Hoe langer de extra stijging van de grondwaterstand door het openen van de kanaalbodem duurt, hoe groter de kans op extra wateroverlast.
2. Schade aan fundering door zettingen. Dit kan alleen optreden als de marge tussen de belasting op de fundering en het draagvermogen van de fundering gering is en de grondwaterstand bij de fundering hoogtes bereikt, die daarvoor nog nooit bereikt zijn. Ook bij een zeer korte duur van de extra stijging van de grondwaterstand door het openen van de kanaalbodem kan er bij nog niet eerder bereikte grondwaterstanden zettingen optreden.

Hydrologische beschouwingen

Dit hoofdstuk beschrijft de bouw en resultaten van een lokaal grondwatermodel rond een huis in de directe omgeving van het kanaal. Eerst is onderzocht of het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren van het kanaal een significante grondwaterstijging tot gevolg kan geven. Daartoe zijn de grondwaterstandmetingen in de omgeving geanalyseerd. Vervolgens is een grondwatermodel opgezet bestaande uit een lokale uitsnede van het regionale MIPWA model met een veel dichter rekengrid, zowel in laterale richting (1 bij 2 m cellen) als in verticale richting (64 lagen). Met behulp van gevoeligheidsanalyses op basis van gemeten stijghoogten is met het model bepaald welke parametervariatie realistisch gezien mogelijk is. Op basis daarvan zijn scenario's doorerekend en de resultaten daarvan gepresenteerd.

4.2 Aanpak op basis van beschikbare metingen

4.2.1 Analyse van gemeten grondwaterstanden gedurende het baggeren

Om inzicht te krijgen in het effect van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren op de grondwaterstanden zijn voorafgaand aan het baggeren in de buurt van het kanaal peilbuizen geplaatst (Figuur 4.1) en bemeten tijdens de uitgevoerde baggerwerkzaamheden (periode oktober 2011 tot december 2012). De precieze diepte van de filters is onbekend maar er wordt vanuit gegaan dat de freatische grondwaterstand wordt gemeten. Figuur 4.2 laat de resultaten van de grondwaterstandsmetingen op deze locaties zien voor de periode waarin de baggerwerkzaamheden hebben plaatsgevonden. Als referentie zijn in deze figuur ook de neerslag en de gemeten stijghoogte in peilbuis B28B0128-001, die op een afstand van circa 400 meter van het kanaal ligt, weergegeven.

Vergelijking van de gemeten grondwaterstanden met meetpunt B28B0128-001, de enige beschikbare referentie buis in de buurt, is niet helemaal zuiver, omdat het filter van deze buis ligt op een diepte van ongeveer 16 meter onder maaiveld, onder een kleilaag (Figuur 4.9). Deze peilbuis meet dus feitelijk niet de freatische grondwaterstand, maar de stijghoogte in het watervoerend pakket daaronder en daarmee dus ook slechts sterk gedempt het effect van grondwateraanvulling door neerslag.

Figuur 4.3 toont de variatie ten opzichte van het gemiddelde grondwaterpeil voor peilbuizen 3, 4 en 11. De natuurlijke variatie van de grondwaterstanden tussen de seizoenen blijkt 0,5 tot 1 meter. De gemeten stijghoogtes zijn allen sterk gerelateerd aan de hoeveelheid neerslag. Alle meetpunten bereikten in de natte winter van 2011 – 2012 hun hoogste gemeten waarde over de weergegeven periode oktober 2011 tot december 2012.

Figuur 4.4 geeft naast het verloop van de neerslag een overzicht van de minimum temperatuur gedurende deze periode. Daaruit blijkt dat er gedurende een periode van twee weken van eind januari tot half februari strenge vorst is geweest met temperaturen van 10 tot 15 graden onder nul. Mogelijk is er toen wegens ijsgang niet gebaggerd. De grondwaterstanden gaan in deze periode ook sterk omlaag. Die daling kan ook veroorzaakt zijn door bevroren grond waardoor aanvulling van het grondwater tijdelijk gestopt is.

Analyse grondwaterstandsverloop loodrecht op het kanaal

De grondwaterstand in peilbuizen 3 en 4, beide op een afstand van ongeveer 12 meter vanaf het kanaal, zijn erg vergelijkbaar en schommelen tussen NAP +7,2 m en NAP +8,0 m. Op beide locaties zijn geen andere peilbuizen op iets grotere afstand van het kanaal. Op de locatie van peilbuizen 11a t/m 11c is een duidelijke afname van de grondwaterstand in westelijke richting te zien: de grondwaterstand in de peilbuis 11a nabij het kanaal (14 m afstand) ligt gemiddeld 51 cm en 77 cm hoger dan respectievelijk peilbuizen 11b (32 m afstand) en 11c (137 m afstand). Opmerkelijk is dat de fluctuatie van de grondwaterstand in buis 11b een stuk groter is dan in buis 11a en in buis 11c weer kleiner is dan in buis 11b en vergelijkbaar met is buis 11a.

In de maanden mei en juni 2012 lopen de gemeten stijghoogtes in buis 11b en 11c op met respectievelijk ongeveer 40cm en 25 cm, terwijl de gemeten stijghoogtes in de overige buizen ongeveer gelijk blijven. De gemeten stijghoogte in buis 11a die 18 m dicht bij het kanaal ligt dan buis 11b, blijft ook ongeveer gelijk. Als de stijging in buis 11b in deze periode wordt veroorzaakt door het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren, zou de stijging in buis 11a groter moeten zijn. Daarnaast gaat de stijging in buis 11b vrij geleidelijk en gaat daarna ook niet meer omlaag. Dat zou duiden op een zeer langdurige periode dat de gebaggerde bodem open blijft. Dat is onwaarschijnlijk. Ook is er in de andere meetpunten op geen enkel moment een vergelijkbaar afwijkende stijging te zien, terwijl ook hier het baggeren in deze periode heeft plaatsgevonden.

Een mogelijke verklaring voor de afwijkende gemeten stijging is dat de grondwateraanvulling door infiltrerende neerslag direct langs het kanaal relatief klein is door de aanwezigheid van verhard oppervlak (weg en fietspad). Buis 11c ligt in het weiland achter de panden en wordt waarschijnlijk beïnvloed door aanwezige drainage. Buis 11b ligt in onverhard gebied zonder drainage.

In de zomer (van 2012) neemt de stijghoogte af met ruim één meter vanaf het kanaal (peil NAP +9,1 m) naar peilbuis 11a (+7,8 m) over een afstand van 14 m. Weer 18 meter verder, bij peilbuis 11b, is een verdere afname met 0,5 m zichtbaar (variërend tussen +7,0 en +7,4m). In peilbuis 11c (variërend tussen +6,9 en +7,2m), op 137 meter vanaf het kanaal is de stijghoogte nog een paar decimeter verder afgenomen.

Het verloop van de grondwaterstand in peilbuis 9a en 9b is, met uitzondering van 2 pieken in januari 2012, vrij vlak en geeft nauwelijks verschil weer tussen meetpunten op 22 en 41 m afstand vanaf het kanaal.

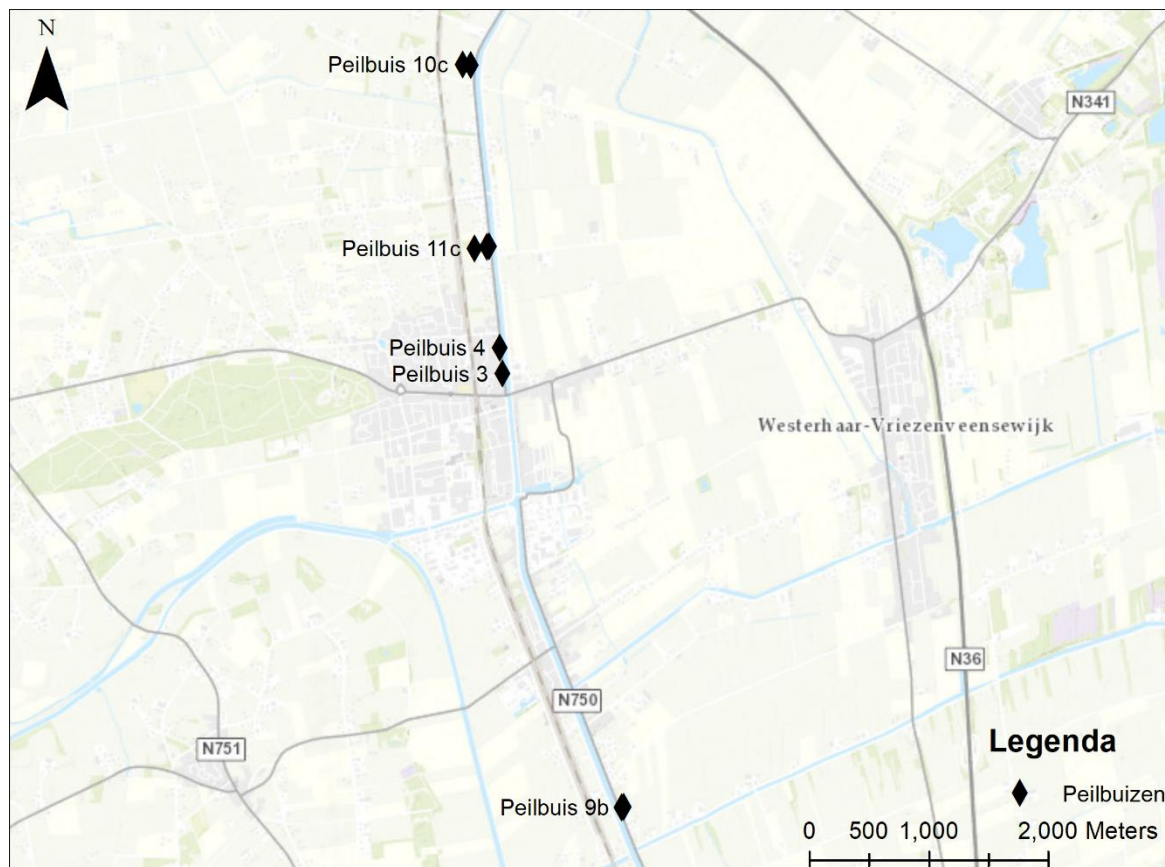
Bij peilbuizen 10a t/m 10c ligt de grondwaterstand op 19 meter vanaf het kanaal ruim 60 cm hoger dan de peilbuis op 37 meter afstand. Tussen de meetpunten op 37 en 105 meter afstand is maar weinig verschil te zien. Dit kan worden veroorzaakt, omdat het hier een landbouwperceel betreft dat goed gedraineerd is.

Analyse grondwaterstandsverloop in lengterichting van het kanaal

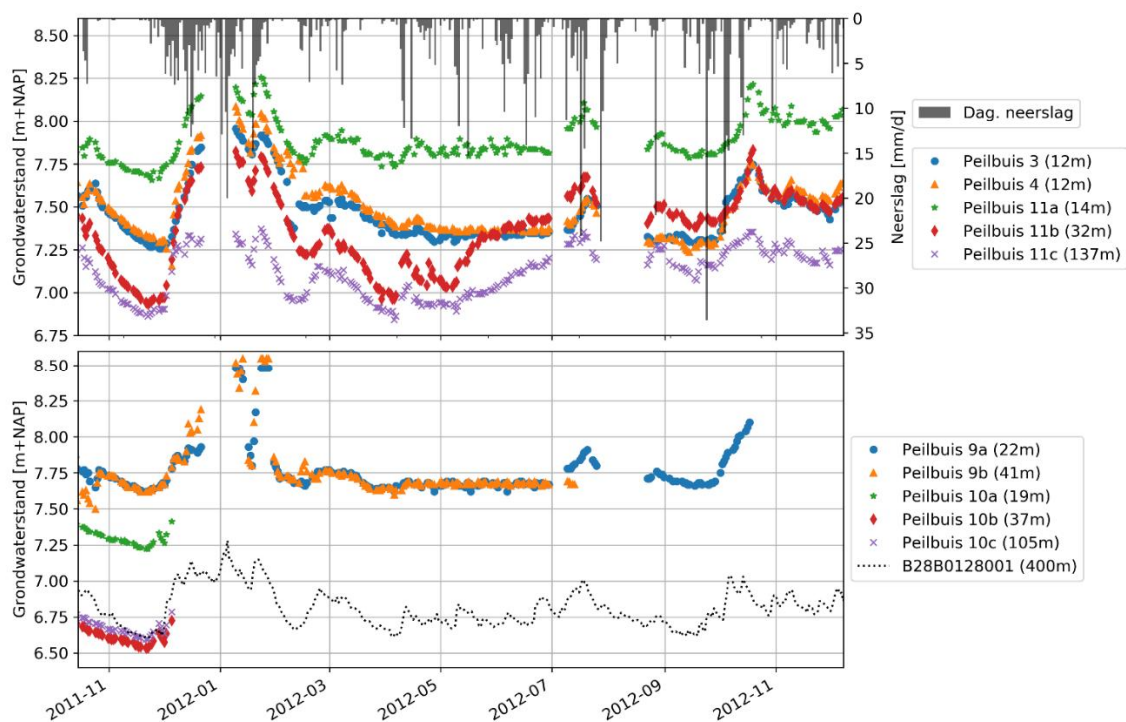
Het regionale stijghoogtebeeld (Bijlage B) geeft een verval van de grondwaterstand in noordelijke richting van locatie 9 naar locatie 10 van orde 1 meter. De gemeten stijghoogten in de beschouwde peilbuizen sluiten aan bij dit beeld. Dissonanten in dit beeld zijn peilbuis 11a en in mindere mate peilbuis 10a. Peilbuis 11a (14 m van het kanaal) ligt over de gehele periode circa een halve meter hoger dan de 1 km zuidelijker gelegen peilbuizen 3 en 4 (beide op 12 m van het

kanaal), maar ook ongeveer 10 cm hoger dan de 5 km zuidelijker gelegen peilbuis 9a (22 m van het kanaal). De weer 1500 m noordelijker gelegen peilbuis 10a (met 19 m iets verder van het kanaal af) vertoont in de beperkte periode, dat er data zijn, vergelijkbare niveaus met peilbuizen 3 en 4. Dit beeld is vrij constant over de gehele meetperiode. Dat lijkt er op te duiden dat bij peilbuis 11a het contact tussen kanaal water en grondwater het grootst is. Omdat dit over de gehele meetperiode van meer dan een jaar het geval is, lijkt het onwaarschijnlijk dat dat een effect is van baggeren van de kanaalbodem.

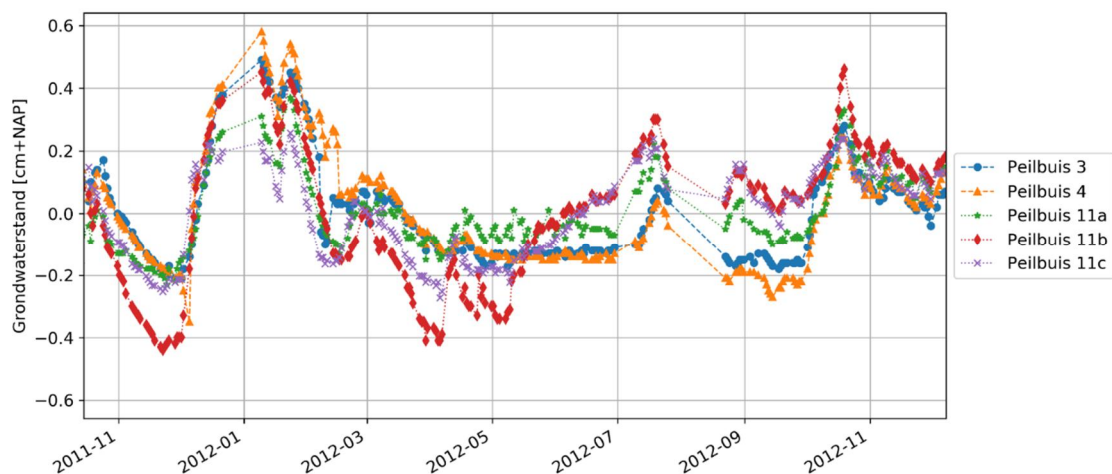
Het verschil tussen de peilbuizen in het verloop van de grondwaterstanden rondom het kanaal kan onder andere worden verklaard door lokale verschillen in bodemopbouw, waterdichtheid van damwanden en weerstand van de kanaalbodem (sliblaag).



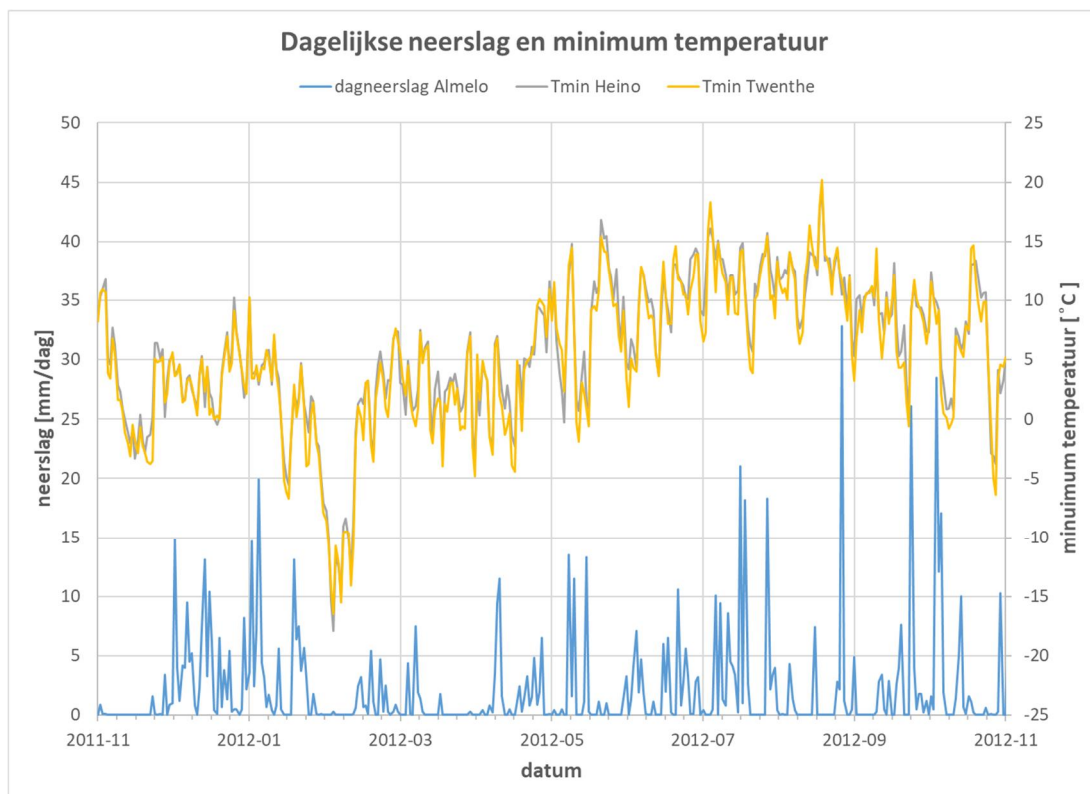
Figuur 4.1 Peilbuizen nabij het kanaal in de omgeving van Vroomshoop, geplaatst tijdens de baggerwerkzaamheden



Figuur 4.2 Dagelijkse neerslag en grondwaterstanden gemeten in peilbuizen 3, 4, 9a-b, 10a-c en 11a t/m 11c tijdens het baggeren. Peilbuis B28B0128001 is toegevoegd als referentie en ligt op grotere afstand van het kanaal



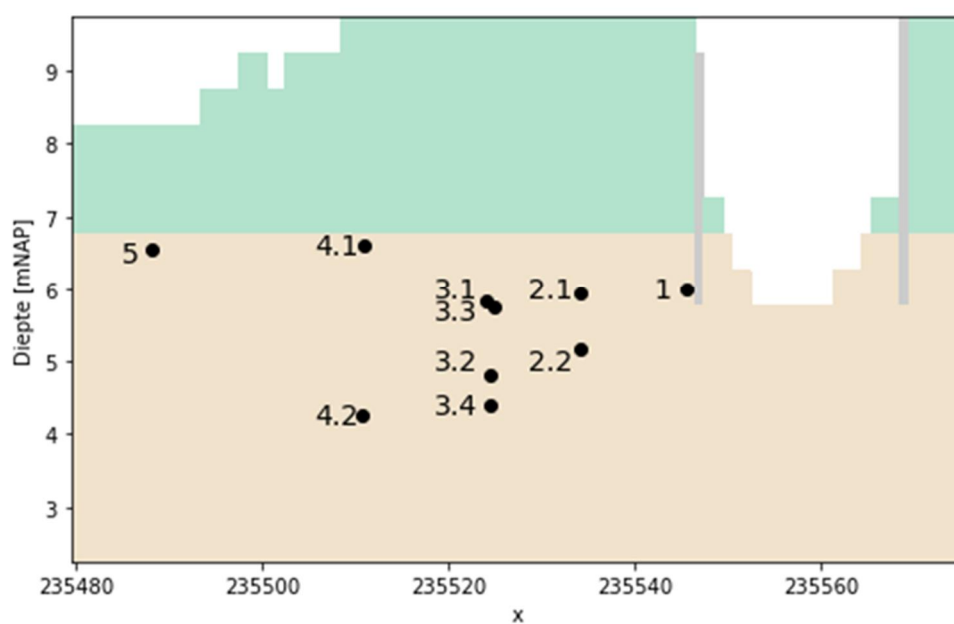
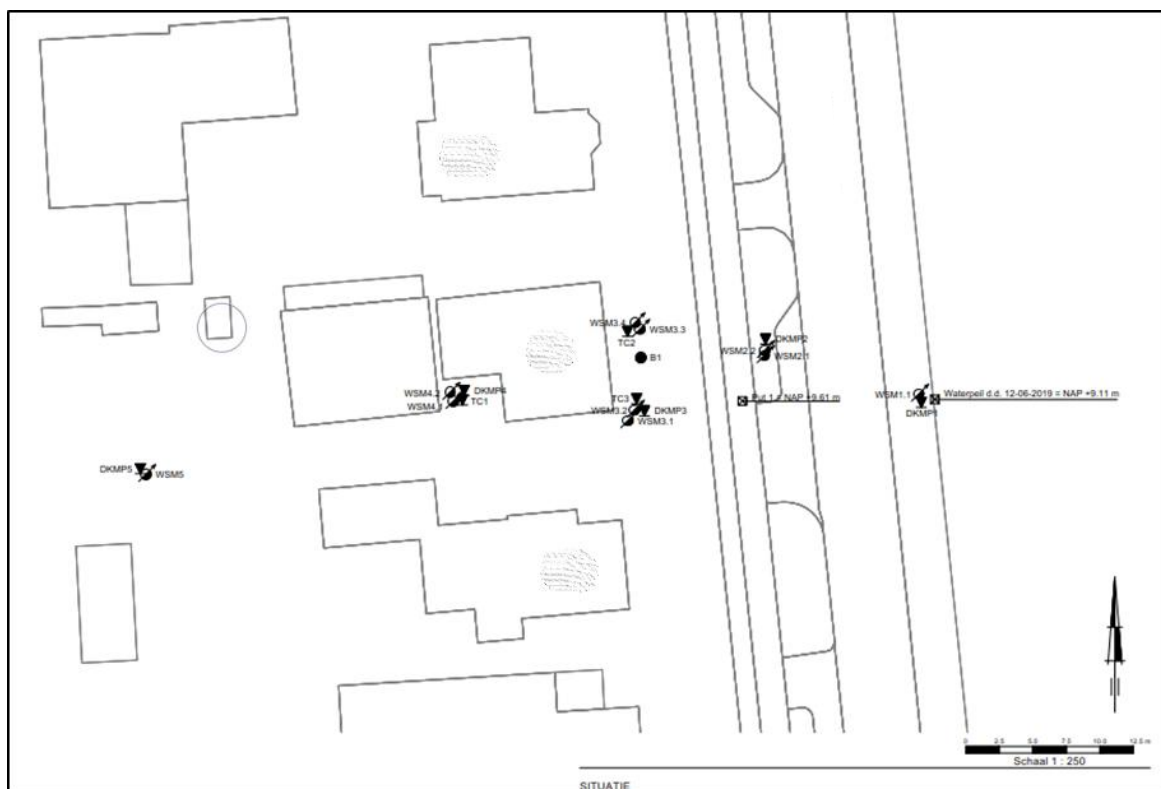
Figuur 4.3 Variatie van de grondwaterstanden in Vroomshoop in peilbuizen 3, 4 en 11a t/m c. ten opzichte van de gemiddelde grondwaterstand op locatie van de peilbuis



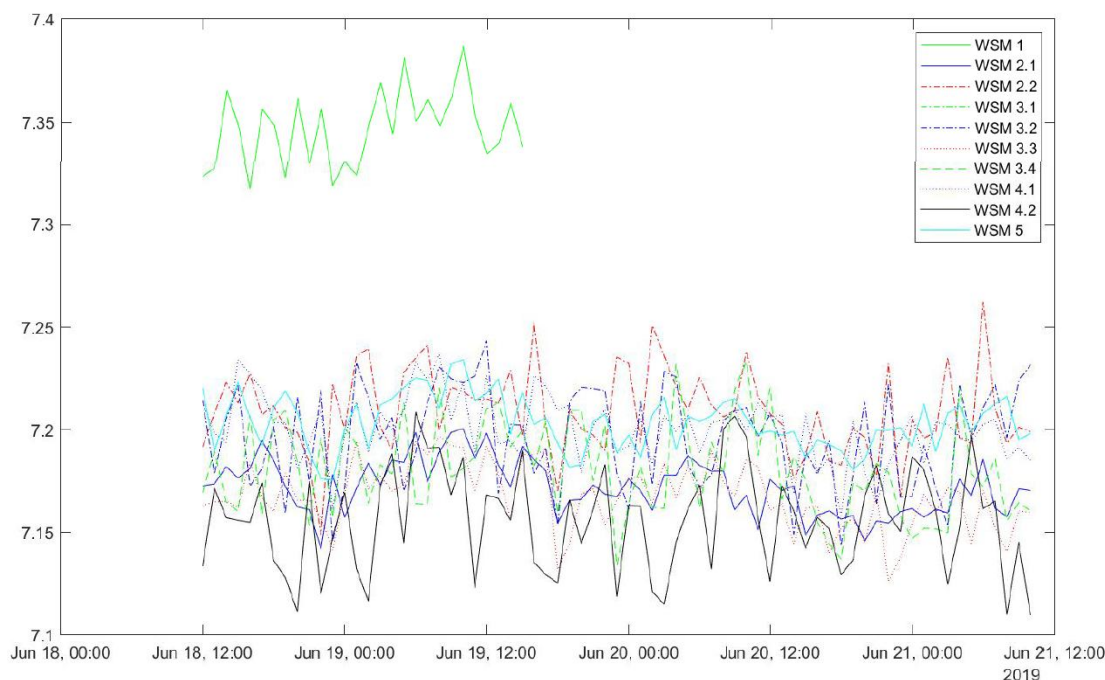
Figuur 4.4 Dag neerslag van KNMI station Almelo en minimum dag temperaturen van KNMI stations Heino en Twenthe

4.2.2 Grondwaterstandsmetingen prioriteitspand

In juni 2019 zijn gedurende enkele dagen waterspanningsmeters (en trillingsmeters) geïnstalleerd om na te gaan of trillingen veroorzaakt door zwaar weg- en/of scheepvaart verkeer tijdelijke wateroverspanningen in de ondergrond kunnen genereren en daarmee de draagkracht van funderingen kunnen beïnvloeden. Deze meetinstrumenten zijn rondom het perceel van een prioriteitspand geplaatst (Figuur 4.5 en Figuur 4.6, zie ook hoofdstuk 5.7). Deze metingen zijn ook gebruikt voor de analyse van de grondwaterstanden. Het waterpeil van het kanaal Almelo – de Haandrik ligt op ongeveer NAP +9,1 m. Direct naast het kanaal (afstand ongeveer 1 meter) was de grondwaterstand in deze zomersituatie NAP +7,35 m. Vanaf een afstand van ongeveer 12 meter lag de grondwaterstand over de rest van het perceel rond NAP +7,2 m. Direct naast het kanaal is er een sterke afname van de grondwaterstanden. Er is dus een kleine invloed binnen een zone van enkele meters naast het kanaal gemeten in juni 2019. Dit betekent dat er veel hydraulische weerstand is tussen het kanaal water en het grondwater in de omgeving. Dit kan worden veroorzaakt door bijvoorbeeld de bodemopbouw, damwanden en een sliblaag op de kanaalbodem. Het kan ook betekenen dat er een uitstekend werkende drain (met een uniform drainage niveau) ligt rondom de bebouwing naast het kanaal.



Figuur 4.5 Locatie van de druksensoren op en rondom het perceel van het prioriteitspand (boven) en in een doorsnede door het kanaal en perceel (onder)



Figuur 4.6 Grondwaterstanden in juni 2019 gemeten met behulp van druksensoren geplaatst rondom het perceel van het prioriteitspand

4.2.3 Conclusies beschikbare metingen grondwaterstand

De beschikbare metingen bewijzen niet eenduidig dat een structurele verhoging van de grondwaterstand is opgetreden door het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren, ook niet gedurende korte tijd. Dat wil echter niet zeggen dat een (kortstondige) stijging van het grondwater door de baggerwerkzaamheden is uitgesloten.

Om deze reden is in het kader van dit onderzoek besloten om met een grondwatermodel mogelijk opgetreden effecten in te schatten (zie paragraaf 4.3). De achterliggende onderzoeksvraag hierbij is: “Kan het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren een grondwaterstandsverhoging hebben veroorzaakt die groot genoeg is om schade aan panden of wateroverlast te veroorzaken?”.

4.3 Modelling grondwaterstand

Voor de modellering is het prioriteitspand als referentie gekozen omdat bij dit perceel in hoog detail is gemeten en de bodemopbouw goed bekend is.

4.3.1 Aanpak modellering

Als casus voor het bepalen van mogelijk opgetreden grondwatereffecten is een lokaal grondwatermodel opgesteld rond een perceel direct nabij het kanaal. Het model is gemaakt op basis van het 3D regionale grondwatermodel MIPWA 3.0. Tijdens het onderzoek is lokale informatie langs het kanaal verkregen waarmee een verfijnd model van de ondergrond is samengesteld. Dit model is gekalibreerd aan de hand van de grondwaterstandsmetingen die recent zijn uitgevoerd op en rondom het perceel van het prioriteitspand. Daarmee kan het model als representatief worden beschouwd voor een situatie zoals die is ontstaan enkele jaren na de laatste keer baggeren. Voor het analyseren van de situatie vooraf en tijdens het baggeren worden scenario's doorgerekend, waarin weerstanden en de geometrie van het kanaal worden gevarieerd. Het effect van verandering van de bodem weerstand van het kanaal is het grootst in de zomer: dan zijn grondwaterstanden het laagst, en is er maximale ruimte voor stijging voordat ondiepe drainagesystemen (sloten in het achterland, afstroming over maaiveld) actief worden. Om beïnvloeding van effecten door aftopping van hoge grondwaterstanden door ondiepe

drainagesystemen te voorkomen is er zonder grondwateraanvulling gerekend in het lokale model. Dit wil zeggen dat neerslag en verdamping in de berekeningen geen bijdrage leveren.

Kanttekening daarbij is dat de freatische bergingscoëfficiënt, die in de model berekening constant is in de tijd, dan relatief hoog is, waardoor de stijging van de grondwaterstand minder is en relatief trager optreedt. Een lagere bergingscoëfficiënt resulteert in sneller veranderende grondwaterstanden, omdat er minder watervolume nodig is voor een stijging of daling. De maximaal mogelijke grondwaterstand (in een stationaire situatie) verandert er niet door. Hoe dichterbij de grondwaterstand onder maaiveld komt, des te kleiner wordt de bergingscoëfficiënt. Dan zou de stijging dus nog iets beter zichtbaar moeten zijn in de metingen.

De volgende stappen zijn genomen:

- Er is een uitsnede van het regionale grondwatermodel MIPWA 3.0 gemaakt voor het gebied rond kanaal Almelo-De Haandrik (beschreven in paragraaf 4.3.3).
- Voor deze uitsnede is de meteorologische invoer verlengd tot en met 2019 (paragraaf 4.3.4). Hiermee zijn tijdsafhankelijke (= niet-stationaire) runs uitgevoerd.
- Deze uitvoer is gebruikt als randvoorwaarde binnen een stationair "casus model" rond het prioriteitspand (paragraaf 4.3.5). Binnen dit casus model is de ondergrond (paragraaf 4.3.5.2) en het kanaal (paragrafen 4.3.5.5 en 4.3.5.6) in verder detail uitgewerkt.
- Dit casus model is vergeleken en aangepast aan de hand van metingen bij het prioriteitspand (paragraaf 4.4).
- Vervolgens is de casus geanalyseerd aan de hand van scenario's (paragraaf 4.5).
- Naar aanleiding van de stationaire berekeningsresultaten zijn aansluitend nog enkele tijdsafhankelijke berekeningen uitgevoerd en geanalyseerd (paragraaf 4.5.5).
- De conclusies betreffen onder andere de meest waarschijnlijke grondwaterstandverhoging; deze verhoging is het vertrekpunt voor de analyse van de ongelijke zettingen van de funderingen van de panden in paragraaf 6.3 (paragraaf 4.6).

4.3.2 Gebruikte bestanden

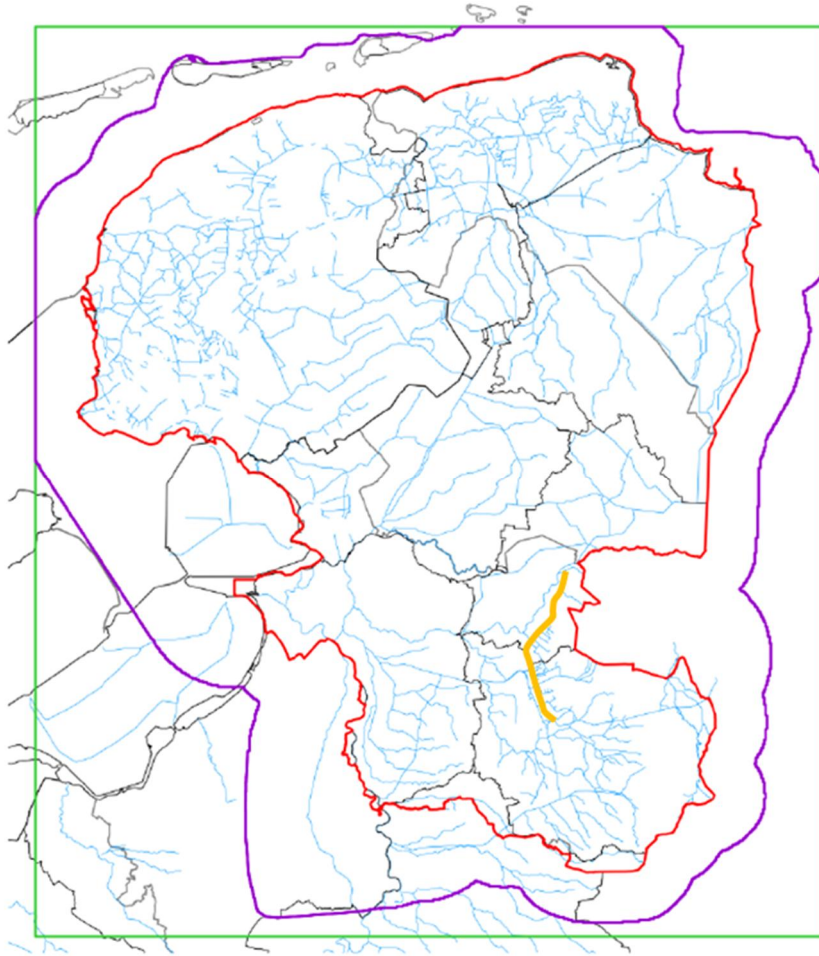
Voor het opzetten en analyseren van het lokale model zijn de volgende bestanden gebruikt:

- MIPWA model, versie 3.0.
- Algemeen Hoogtebestand Nederland versie 2.
- Geologische boorprofielen uit Dinoloket (Mei 2019).
- Profielen diepte/vorm kanaal Almelo – de Haandrik. Versie 2010 (voor baggeren; *B04 DTM juni 2010.tif*) en versie 2016 (na baggeren; *20160411Samengesteld_0,5_rasterized.tif*).
- Locaties stalen en betonnen damwanden langs het kanaal. Ingemeten door RHK-DHV.
- Grondwaterstanden en stijghoogten uit Dinoloket, databases provincie Overijssel en waterschap Vechtstromen en lokale monitoring tijdens en na het baggeren.
- Boringen en grondwatermetingen uitgevoerd in de zomer van 2019 op en rondom het perceel van de het prioriteitspand.
- KNMI landsdekkende neerslag- en verdamping grids voor 2014 t/m 2019.

4.3.3 Het MIPWA model als regionale basis

Als basis van het verfijnde, casus model is het MIPWA 3.0 model gebruikt. Dit regionale grondwater model is ontwikkeld door een consortium van provincies, waterschappen, Vitens, Wageningen Environmental Research en Deltares. Het model beslaat de provincies Groningen, Friesland, Drenthe en Overijssel en heeft een resolutie van 25mx25m en bevat informatie van neerslag, verdamping, etc. over de periode 1989 t/m 2014. De bovenkant van het model is gebaseerd op het AHN2 en de ondergrond is gebaseerd op REGIS II.1 geschematiseerd tot 9 modellagen met variërende dikte. Het model bevat grote en kleine waterlopen, drainage systemen en grondwaterwinningen.

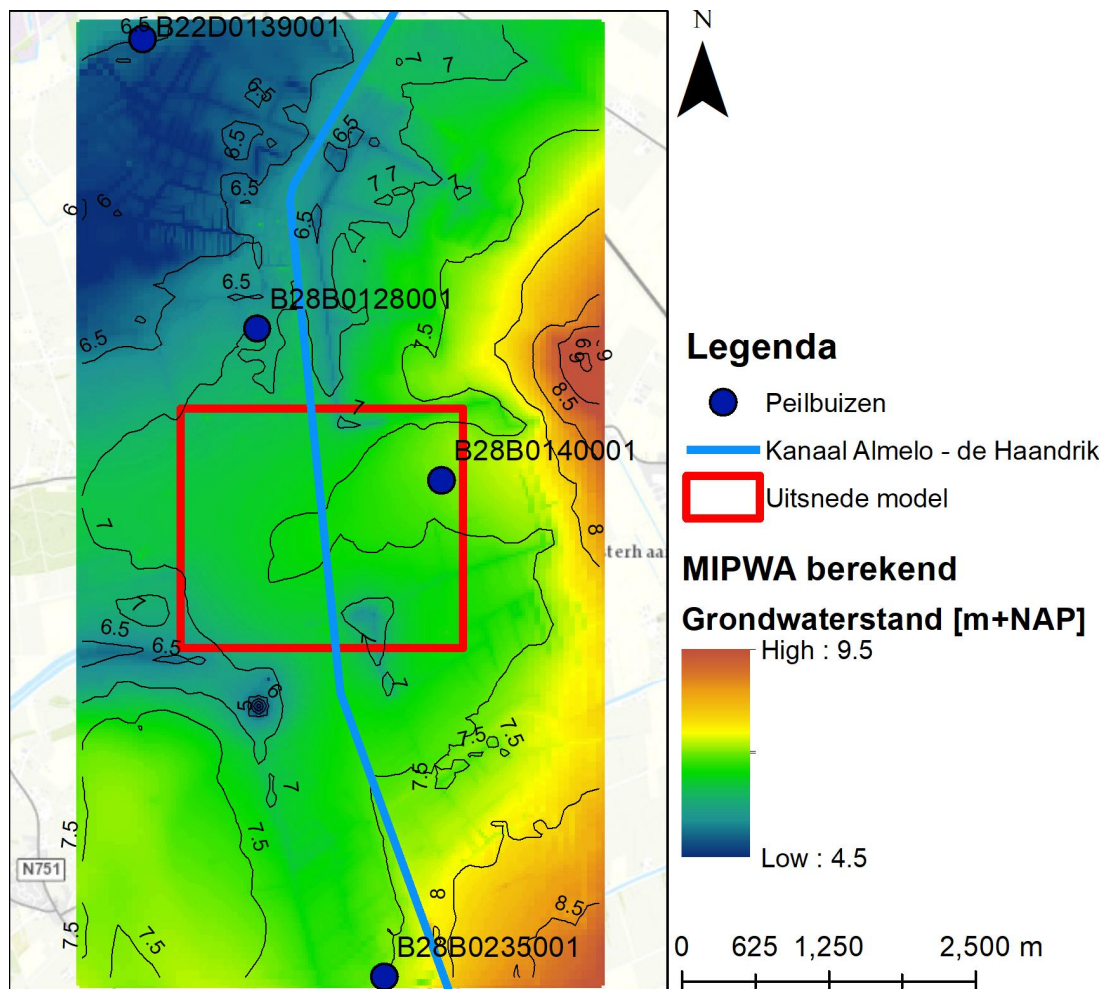
Voor het huidige project is een uitsnede van het MIPWA model gemaakt van het gebied rondom kanaal Almelo – de Haandrik (Figuur 4.7) en is de rekenperiode van het model verlengd t/m begin 2019 op basis van KNMI neerslag/verdamping reeksen. Met dit model kunnen op schaal van het volledige gebied rondom het kanaal grondwaterstanden op een tijdsafhankelijke manier worden berekend.



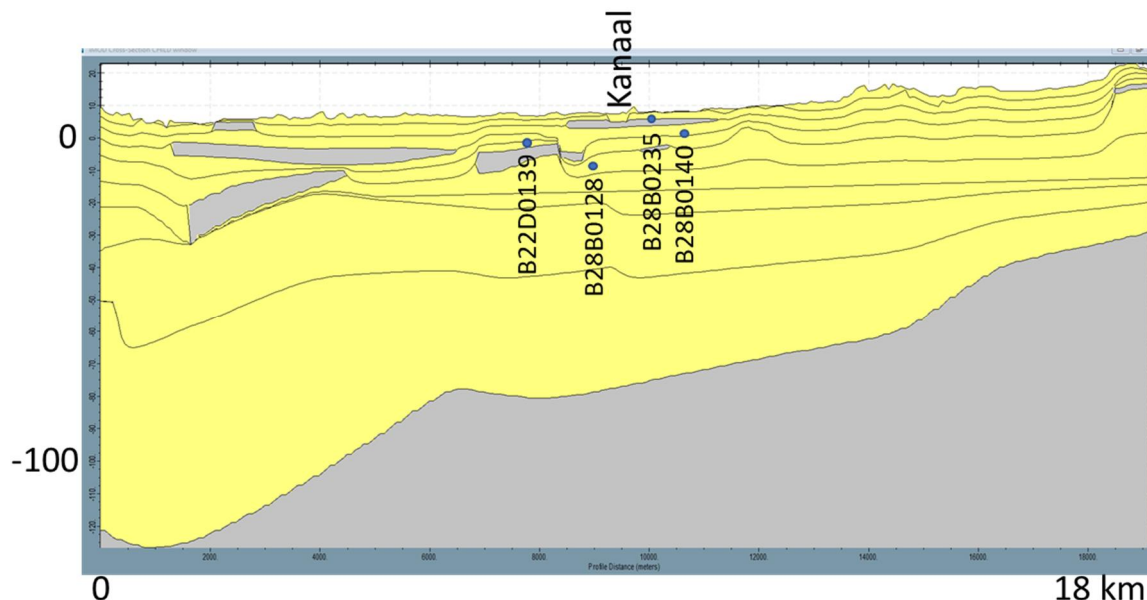
Figuur 4.7 Begrenzing van het MIPWA model (groen) met het kanaal Almelo – de Haandrik in oranje

4.3.4 Resultaten regionale MIPWA model

De resultaten van het uitgesneden MIPWA model laten de grondwaterstanden op de grotere schaal zien (Figuur 4.8). De regionale grondwaterstroming is van oost naar west gericht en de invloed van de verschillende ontwateringssystemen (sloten, beken en dergelijke, zichtbaar in de kaartlaag op de achtergrond) is duidelijk zichtbaar.



Figuur 4.8 Gemiddelde grondwaterstanden 1989-2018 berekend voor de bovenste modellaag 1 in het MIPWA model voor het gebied tussen Mariënborg en Vriezenveen. Metingen ter hoogte van de aangegeven peilbuizen staan in Figuur 4.10. Het rode kader geeft de uitsnede aan die gebruikt is voor het verfijnde model



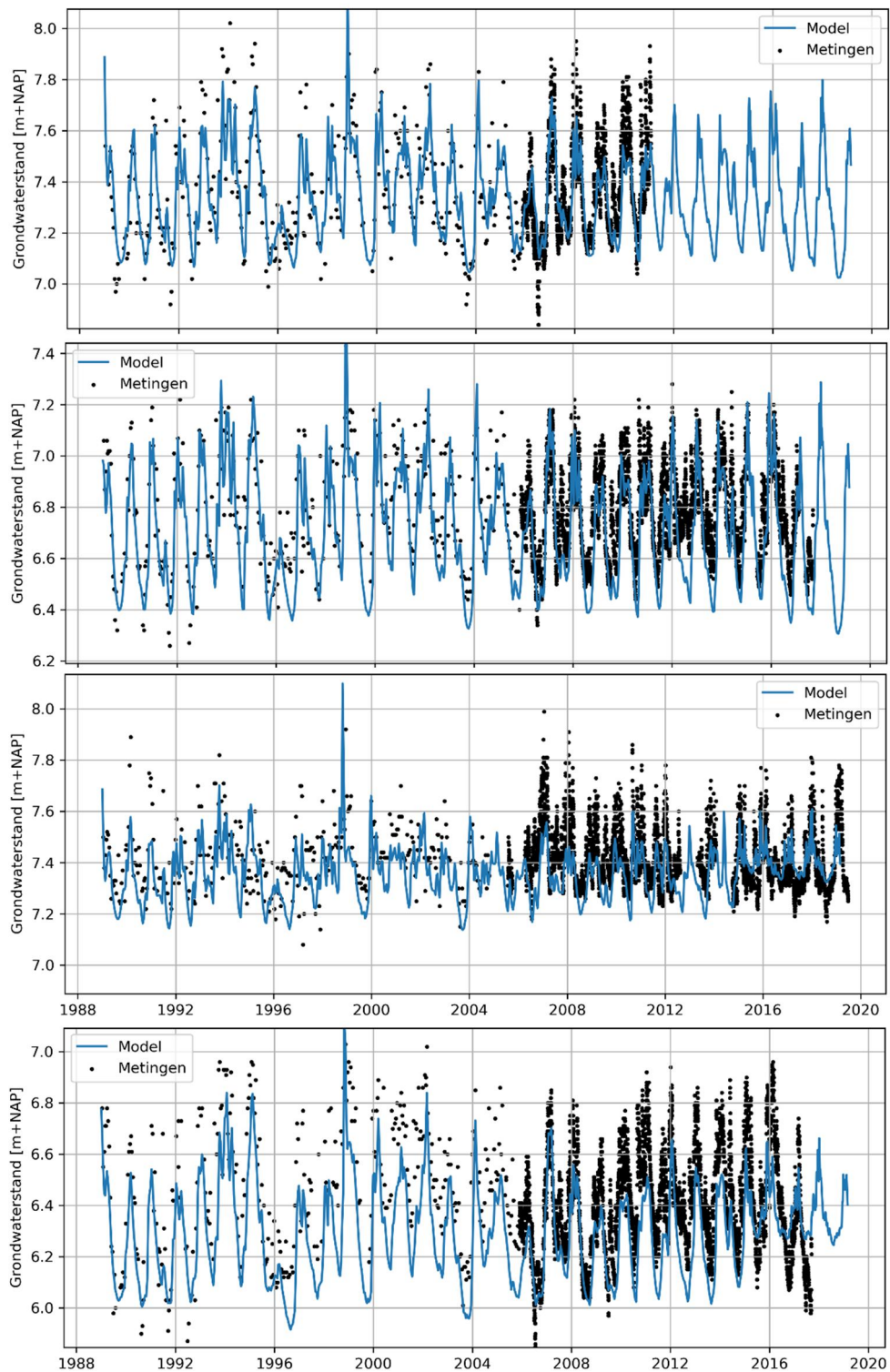
Figuur 4.9 Schematische weergave van de ondergrond in een oost-west doorsnede ter hoogte van Vroomshoop. De ondergrond bestaat hoofdzakelijk uit watervervoerende pakketten (geel) met enkele ondoorlatende lagen (grijs). Het kanaal ligt ongeveer in het midden van dit figuur en de filterdiepte van de gemarkeerde peilbuizen uit Figuur 4.8 zijn ook aangegeven

Figuur 4.10 toont een vergelijking van de berekende grondwaterstanden uit het MIPWA model met metingen in peilbuizen (Tabel 4.1) in het gebied. Over het algemeen beweegt het grondwater als een 'plaat' op en neer tussen droge en natte perioden. Dit wordt goed gesimuleerd met het model. Verder vallen de gesimuleerde grondwaterstanden binnen de gemeten spreiding. Daarmee is het model goed genoeg om de gesimuleerde stijghoogtes als randvoorwaarde te gebruiken op de buitenranden van het lokale model. Opmerkelijk is dat de berekende stijghoogten, zoals gepresenteerd in Figuur 4.10, in de droge zomer van 2018 lager zijn dan in alle jaren daarvoor bij peilbuizen 128 en 140, terwijl bij peilbuizen 235 en 139 ten opzichte van andere zomers relatief hoge grondwaterstanden laten zien. Figuur 4.9 laat een mogelijke verklaring voor deze verschillen zien. Beide sterker reagerende peilbuizen liggen onder een scheidende laag, terwijl beide andere peilbuizen feitelijk als freatisch kunnen worden beschouwd, waarvan buis 235 het minst diep ligt. Over de hele periode blijkt dat de diepere buizen de meeste variatie in stijghoogte vertonen. Dat duidt erop dat regionale effecten van droge en natte periodes ter plekke van deze peilbuizen meer invloed hebben op de stijghoogte dan lokale effecten. In Bijlage C is een korte analyse van het lokale grondwatersysteem in deze zomer opgenomen.

Tabel 4.1 Namen en locaties van de aangegeven peilbuizen. Tot en met 2005 zijn metingen 2-wekelijks uitgevoerd, sinds 2005 wordt er dagelijks gemeten

Naam peilbuis	X-locatie	Y-locatie	Maaiveldhoogte [mNAP]	Filterdiepte [m-mv]	Afstand tot kanaal [m]
B28B0128001	235039	499377	7.6	15.5	375
B28B0140001	236607	498080	9.2	7.0	1000
B28B0235001	236120	493850	9.1	2.8	500
B22D0139001	234064	501836	8.0	8.5	1750

Uit deze gemeten reeksen is eveneens niet af te leiden dat het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren tot langdurige effecten in de grondwaterstand heeft geleid. Ook is niet te achterhalen of gedurende de werkzaamheden grondwaterstanden (tijdelijk) zijn verhoogd. Gezien de afstand van deze meetpunten tot het kanaal (375 tot 1750 m) is het op voorhand te verwachten dat eventuele effecten van ingrepen op het kanaal, zoals baggeren, in deze peilbuizen niet waarneembaar zijn. Deze mogelijke invloeden kunnen daarom alleen met behulp van modelsimulaties worden achterhaald.



Figuur 4.10 Vergelijk van gesimuleerde grondwaterstanden met het MIPWA model met metingen. Van boven naar beneden peilbuizen 'B28B0128001', 'B28B0140001', 'B28B0235001' en 'B22D0139001' (uit Dinoloket)

4.3.5 Opstellen lokaal casus model

Uit het MIPWA model is een regionale uitsnede gemaakt als basis voor het model voor lokale grondwaterstanden (tot op perceel niveau). Hierbij is het model horizontaal en verticaal verfijnd met aanvullende informatie van de ondergrond. Hieronder worden de stappen beschreven voor het lokale stationaire model voor de casus van het prioriteitspand.

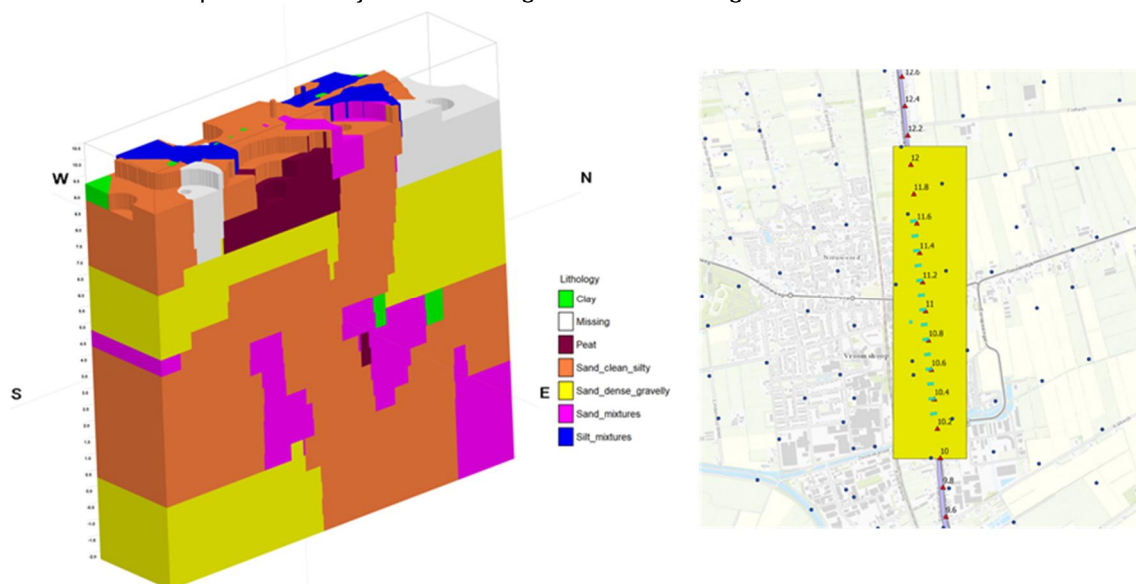
4.3.5.1 Celgrootte

Om de lokale grondwaterstanden beter te simuleren is gekozen het model lokaal te verfijnen tot cellen van 1 bij 2 meter in de directe omgeving van het prioriteitspand. Dit fijne modelgrid is nodig om de geometrie van het kanaal en stroming door de kanaalbodem goed te kunnen representeren. Aan de randen van het lokale model (dus regionaal) zijn cellen met een grootte van 25 bij 25 meter als in MIPWA toegepast.

4.3.5.2 Ondergrond en modellagen

De totale dikte van het ondergrond model is beperkt tot de bovenste 60 meter (van NAP +10 m tot NAP -50 m) en bestaat uit 64 lagen. De bovenste 20 meter hebben een laagdikte van 0,5 meter. Daaronder loopt de laagdikte geleidelijk op tot 5 meter onderin het model.

De schematisatie van de ondergrond is voor de directe omgeving van het kanaal verder verfijnd om de lokale effecten zo goed mogelijk te kunnen berekenen. Hiervoor zijn alle beschikbare geologische gegevens in de omgeving tot een afstand van ongeveer 250 m van het kanaal geïnterpreteerd en tot een 3D ruimtelijk beeld. Daarbij is gebruik gemaakt van interpolatie met behulp van het programma RockWorks. Het resultaat hiervan is een zogenaamd voxel model van de lithologie in een gebied van 2100 bij 500 meter en tot een diepte van NAP -2 m (Figuur 4.11). De doorlatendheden van de verschillende lithologieën zijn ingeschat en in een eenvoudige, handmatige kalibratie enigszins aangepast aan de hand van recente waterspanningsmetingen uitgevoerd langs het prioriteitspand in 2019. De lithologie buiten dit voxel model is overgenomen uit MIPWA. De top van het verfijnde model volgt de maaiveldhoogte uit het AHN2.



Figuur 4.11 Lithologie voxel model van het kanaal Almelo – de Haandrik gezien vanuit het zuidoosten en de ligging van het voxel model in Vroomshoop

4.3.5.3 Sloten en drainage

De buisdrainage en ondiepe sloten in het gebied zijn overgenomen uit het regionale MIPWA model. Deze bevat greppels, landbouw drainage en drainage in het stedelijk gebied (bestaande uit drains, greppels en lekkende riolen).

4.3.5.4 Grondwateraanvulling, oppervlakte water en modelranden

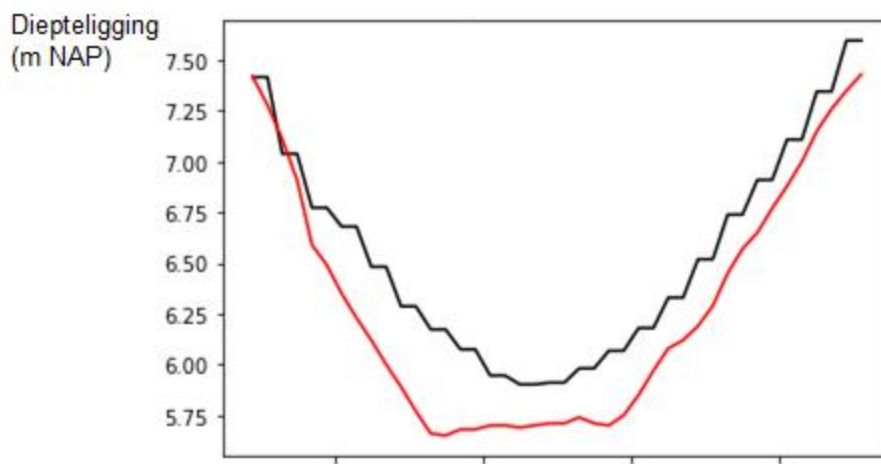
Om de zomersituatie te simuleren bevat het stationaire model een constante grondwateraanvulling van 0 mm/dag (de neerslag is even groot als de verdamping). Aangenomen is dat de grondwaterstand hoofdzakelijk wordt bepaald door de verre omgeving (onder andere stuwwal en IJssel) zoals die in MIPWA zijn opgenomen en de grote oppervlakte wateren en dat de netto grondwateraanvulling verwaarloosbaar is. De modelranden bestaan uit vaste stijghoogten,

die gelijk zijn aan de gemiddelde stijghoogte zoals die voor de periode 2000-2010 berekend is met het regionale MIPWA model.

4.3.5.5 Het Kanaal Almelo - de Haandrik

De waarde voor de weerstand van de kanaalbodem is in eerste instantie ingeschat op basis van ervaring op tenminste 10 dagen. Dit is voor het model omgezet in een verticaal doorlaatvermogen per cel in de MODFLOW River-Package.

Om de breedte van het kanaal, die wordt verdeeld over de cellen, correct mee te nemen is het verticaal doorlaatvermogen van de kanaalbodem gewogen naar het deel van de cel dat in werkelijkheid onderdeel is van het kanaal. Als het kanaal bijvoorbeeld voor de helft in een cel ligt heeft de cel een gehalveerde waarde van het doorlaatvermogen gekregen.

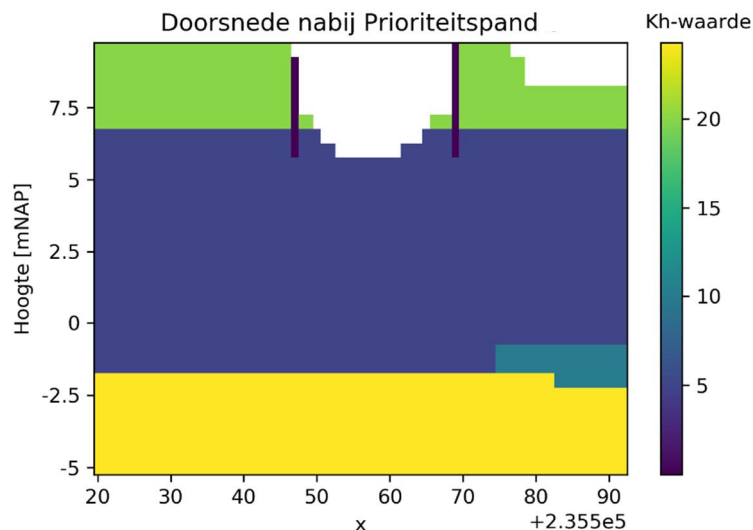


Figuur 4.12 Voorbeeld van een doorsnede van de kanaalbodem op één locatie voor (zwart) en na (rood) het baggeren

Het na het baggeren gemeten kanaalprofiel (breedte, diepte en talud) uit 2016 is gebruikt voor de kanaal dimensies in het model. Als kanaalpeil is een vast waterpeil van NAP +9.1 m gebruikt. Voor de periode tijdens het baggeren is voor de weerstand van de kanaalbodem 1 dag aangenomen. De gevoeligheid van deze parameter is onderzocht; hierop wordt verderop in dit rapport op ingegaan.

4.3.5.6 Damwanden

Langs het kanaal zijn damwanden aangebracht, die de stabiliteit van de kanaaloevers vergroten, maar die daarnaast ook weerstand bieden tegen horizontale stroming van water vanuit het kanaal. Uit veldobservaties is bekend dat de stijghoogte van het grondwater op deze locatie direct naast deze damwanden meer dan een meter kan verschillen met het peil in het kanaal. Deze damwanden zijn in het model aan weersijden van het kanaal aangebracht door middel van een sterk verlaagde horizontale doorlatendheid (K_h) tot een diepte van NAP +6 m (Figuur 4.13). Op basis van het grote verval is ingeschat dat de weerstand van de damwanden in de orde van grootte van 10.000 dagen is. Aan de kanaalkant van de damwanden bevinden zich modelcellen met een vaste stijghoogte van NAP +9.1 m (kanaalpeil).



Figuur 4.13 De Kh waarden in een dwarsdoorsnede door een deel van het model tot een diepte van 15 meter (30 model lagen met een dikte van 0.5 meter). Het kanaal bevindt zich in het midden van het figuur en heeft aan weerszijden verticale damwanden met een lage doorlatendheid ($c = 10.000$ dagen $\rightarrow k = 0,0001$ m/d over een dikte van 1 m)

4.4 Gevoeligheidsanalyse en modelkalibratie

4.4.1 Gevoeligheidsanalyse lokale model

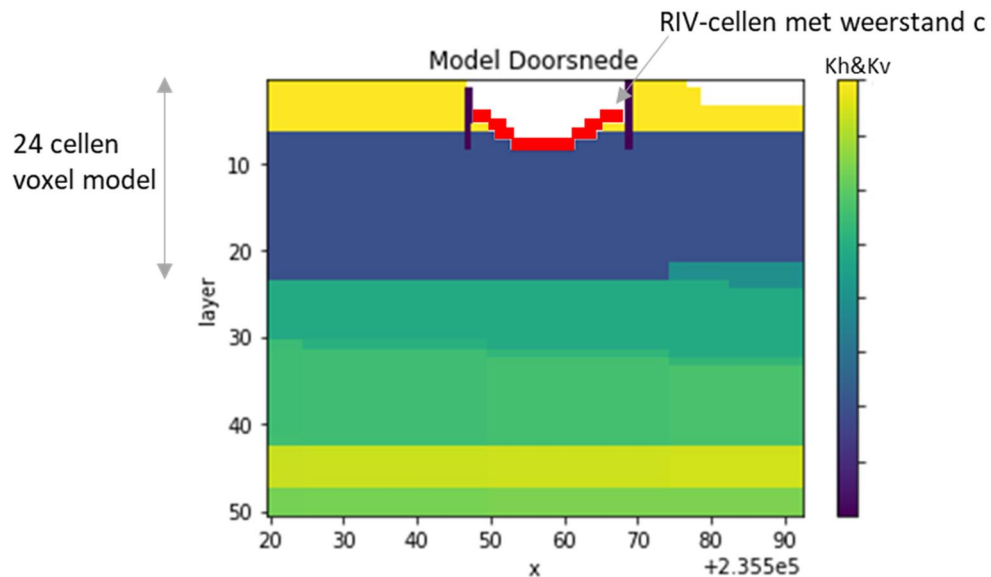
Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met een stationair model. Hierbij zijn onderstaande parameters gevarieerd:

- Verticale doorlatendheid van de ondergrond tot een diepte van NAP -2 m (de diepte tot waarop het verfijnde voxel model reikt) via de verticale anisotropiefactor k_v .
- Horizontale doorlatendheid van de ondergrond tot een diepte van NAP -2 m door middel van vermenigvuldiging van de initiële waarden (Tabel 4.2) met een factor k_h .
- Intreeweerstand van de kanaalbodem C_{intree} .

Bij de gevoeligheidsanalyse zijn de waarden van de parameter steeds overal in het model op gelijke wijze veranderd (bv. overal in het model is de waarde van de horizontale doorlatendheid verdubbeld).

Omdat de weerstand van de damwand twee a drie ordes groter is dan die van de bodemweerstand heeft het op voorhand geen zin om de damwandweerstand mee te nemen.

Combinaties van deze parameters leidt tot 20 scenario's, die beschreven staan in Tabel 4.3, waarbij scenario 0 het uitgangsscenario is. Startwaarden van het model zijn weergegeven in Tabel 4.2.



Figuur 4.14 Doorsnede van het model rondom het kanaal met daarin aangegeven de parameters uit de gevoeligheidsanalyse

Tabel 4.2 K_h -waarden gebruikt als start waarde bij de gevoeligheidsanalyse. Deze waarden zijn bij de analyse met een factor (K_h -factor in Tabel 4.3 vermenigvuldigd. De verticale doorlatendheid (K_v) is berekend door de horizontale doorlatendheid met een anisotropiefactor te vermenigvuldigen

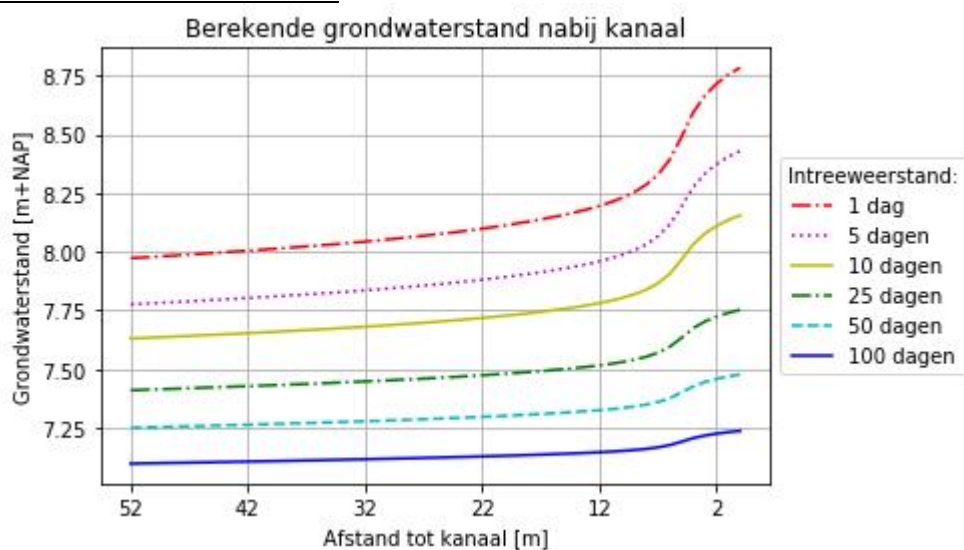
Grondsoort	Start waarde gevoeligheidsanalyse
Grof zand	20 m/dag
Fijn Zand	10 m/dag
Zand mix	5 m/dag
Silt mix	2 m/dag
Veen	0.5 m/dag
Klei	0.01 m/dag

Tabel 4.3 De 20 scenario's binnen de gevoeligheidsanalyse. De K_h wordt gevarieerd met een factor ten opzichte van de initieel gekozen waarden (Tabel 4.2)

Scenario	C_{intree}	k_h factor	Anisotropie factor (k_v)
0	50	1	0.3
1	50	1	0.2
2	50	0.5	0.2
3	50	2	0.2
4	100	1	0.2
5	100	0.5	0.2
6	100	2	0.2
7	50	1	0.1

Scenario	C _{intree}	k _h factor	Anisotropie factor (k _v)
8	50	0.5	0.1
9	50	2	0.1
10	1	1	0.1
11	1	0.5	0.1
12	1	2	0.1
13	1	1	0.2
14	1	0.5	0.2
15	1	2	0.2
16	5	1	0.2
17	10	1	0.2
18	25	1	0.2
19	50	1	0.01
20	1	1	0.01

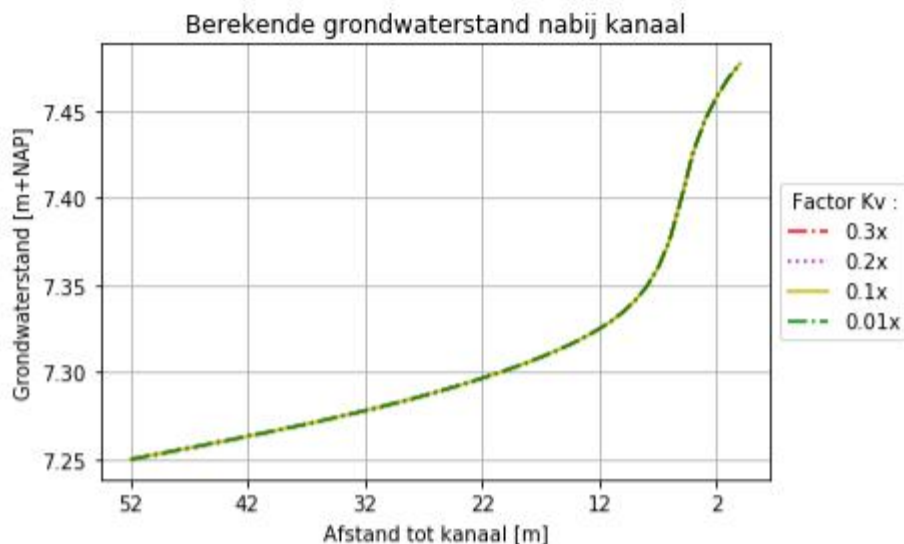
Intreeweerstand kanaalbodem



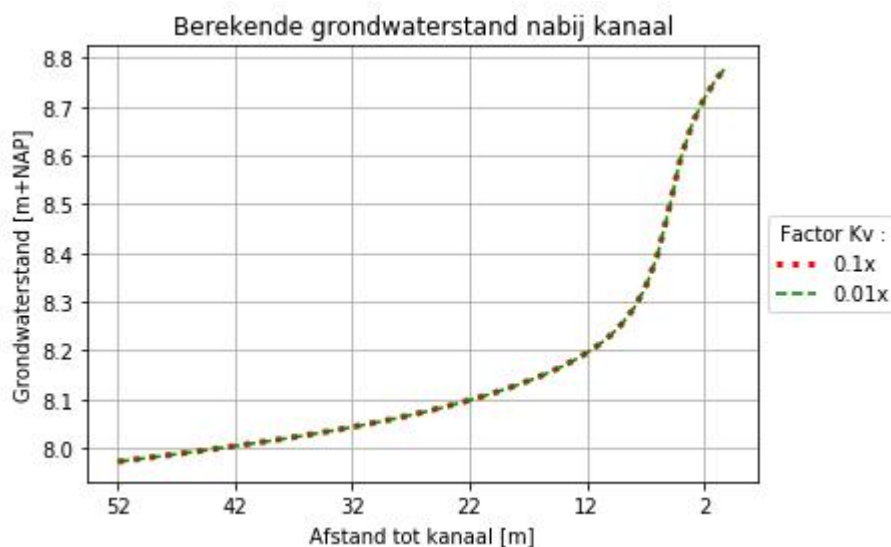
Figuur 4.15 Resultaat van modelberekeningen in de gevoeligheidsanalyse waarbij de intreeweerstand van de kanaalbodem is gevarieerd

De weerstand van de kanaalbodem heeft een groot effect op de stijghoogte rondom het kanaal. Het verschil tussen een weerstand van 1 en een weerstand van 100 dagen loopt bij deze scenario's op tot 1,5 m direct naast het kanaal. Gezien het eerder genoemde verschil tussen grondwaterstand en kanaalpeil (zoals ook zichtbaar in Figuur 4.2) is het niet waarschijnlijk dat de weerstand kleiner is dan 100 dagen (orde grootte). Tijdens het weghalen van de waterbodem kan echter wel een heel lage weerstand zijn opgetreden, en daarvoor geeft de waarde van 1 dag een goede indicatie.

Verticale doorlatendheid bodem



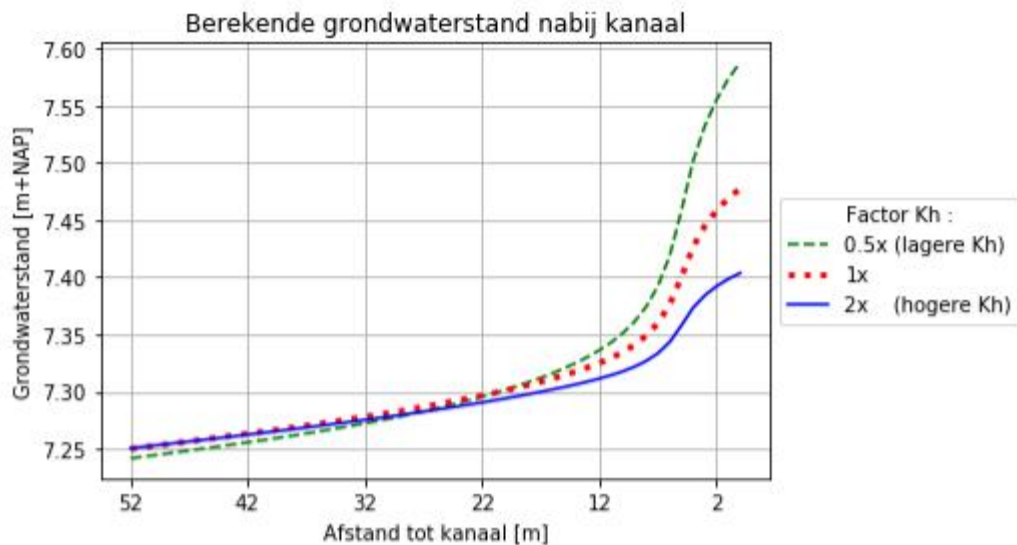
Figuur 4.16 Resultaat van modelberekeningen in de gevoeligheidsanalyse waarbij de verticale doorlatendheid is gevarieerd. In deze berekeningen was de intreeweerstand van de kanaalbodem 50 dagen. De resulterende grondwaterstand is nagenoeg gelijk voor alle 4 scenario's



Figuur 4.17 Resultaat van modelberekeningen in de gevoeligheidsanalyse waarbij de verticale doorlatendheid is gevarieerd. In deze berekeningen was de intreeweerstand van de kanaalbodem 1 dag

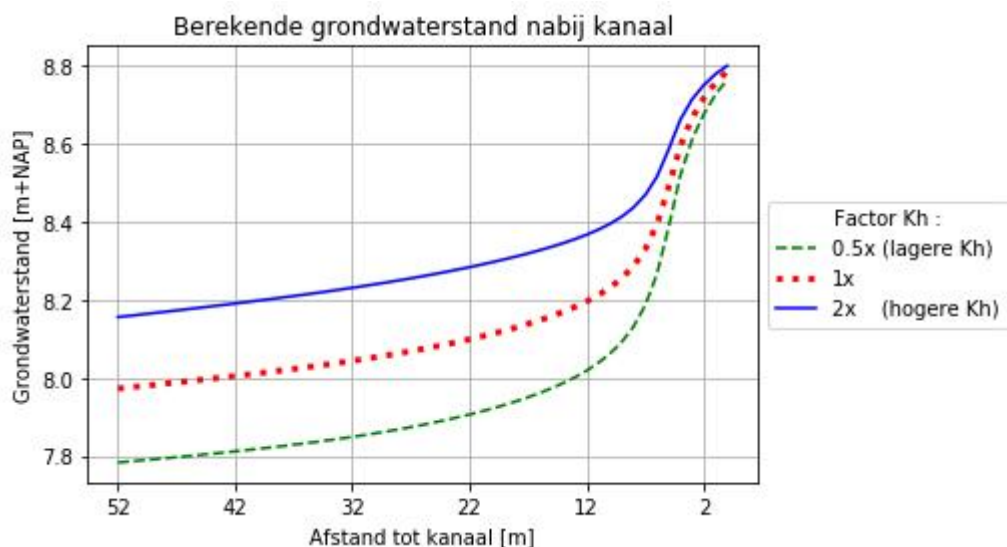
De verticale doorlatendheid in het (bovenste deel van) het watervoerend pakket heeft geen tot weinig effect op de stijghoogte rondom het kanaal, zowel bij een kanaalbodem intreeweerstand van 50 dagen (scenario's 0, 1, 7 en 19) als van 1 dag (scenario's 10 en 20).

Horizontale doorlatendheid bodem



Figuur 4.18 Resultaat van modelberekeningen in de gevoeligheidsanalyse waarbij de horizontale doorlatendheid is gevarieerd. In deze berekeningen was de intreeweerstand van de kanaalbodem 50 dagen

Bij een hoge weerstand in de kanaalbodem heeft de horizontale doorlatendheid slechts een klein effect. Direct nabij het kanaal, tot een afstand van ongeveer 10 meter zorgt een lagere doorlatendheid voor een hogere grondwaterstand. Door een lage doorlatendheid reikt het effect van het kanaal minder ver en wordt het effect van het hogere kanaalpeil over een kleiner oppervlak verdeeld.



Figuur 4.19 Resultaat van modelberekeningen in de gevoeligheidsanalyse waarbij de horizontale doorlatendheid is gevarieerd. In deze berekeningen is de intreeweerstand van de kanaalbodem 1 dag

Bij een lage weerstand van de kanaalbodem heeft de horizontale doorlatendheid een groter effect. Net als bij een lage bodemweerstand zorgt een lagere horizontale doorlatendheid voor een grotere helling in de grondwaterstand nabij het kanaal: het verschil tussen de stijghoogte direct naast het kanaal en op 50 meter afstand is ongeveer 60 cm bij scenario 12 (hoge horizontale

doorlatendheid), maar bijna een meter bij scenario 11 (lage doorlatendheid). Een hoge doorlatendheid zorgt echter ook voor een verhoging van de stijghoogte in de gehele omgeving, doordat het infiltrerende kanaalwater zich gemakkelijk kan verdelen. Een verdubbeling van de horizontale doorlatendheid (scenario 11 naar 10, en 10 naar 12) resulteert in een verhoging van de grondwaterstanden met circa 20 cm op een afstand van 50 meter vanaf het kanaal.

Combinatie van Figuur 4.15, Figuur 4.18 en Figuur 4.19 leert dat een permanente verlaging van de bodemweerstand van 50 dagen naar 1 dag in een gebied met een twee keer zo hoge doorlatendheid zou resulteren in een circa 20 cm grotere stijging van de grondwaterstand op 20 m afstand van het kanaal. Omdat de gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd met een stationair model, waarbij dus uitgegaan wordt van een permanente verwijdering van de bodemweerstand, is de berekende 20 cm grotere stijging een overschatting van het effect van een twee keer zo hoge doorlatendheid.

Grondwaterstijging door lekkage van de damwand

Aan weerszijden van het kanaal bevinden zich damwanden die in het model zijn ingevoegd door het toevoegen van een weerstand van 10.000 dagen. De diepte van de damwanden is niet exact bekend. Verder is wel bekend dat ze al langer aanwezig zijn en dat mogelijk lokaal lekkage kan optreden, met name op de aansluitingen van de afzonderlijke damwandplanken. Lekkage van de damwanden zal leiden tot een permanente grondwaterstandsverhoging in de omgeving van het lek.

Lekkage van de damwand zorgt ervoor dat de bodem direct naast de damwand in verbinding komt te staan met een waterhoogte van NAP +9,1 m. Uitgaande van een bijna weerstandloze verbinding (vergelijkbaar met een vers gebaggerde bodem) zorgt dit voor een stijging van het grondwater tot bijna NAP + 9,1 m direct naast het lek. Deze verhoging van de grondwaterstand neemt in alle richting af vanaf het lek, in een radiaal patroon. Uit berekeningen blijkt dat bij een lekkage over een breedte van een decimeter de maximale stijging op een afstand van 8 meter kleiner dan 23 cm is, en op een afstand van 25 meter circa 11 cm.

Conclusies gevoeligheidsanalyse

De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de weerstand van de kanaalbodem de belangrijkste parameter voor de grondwaterstanden in de omgeving van het kanaal is. Het doordringen van het kanaalwaterpeil in de bodem wordt bepaald door de som van de verticale weerstanden van zowel de kanaalbodem als bodemlagen. Door de vrij zandige bodemstructuur zorgt de sliblaag op de bodem van het kanaal vermoedelijk voor het grootste deel van de verticale weerstand. De horizontale doorlatendheid van de bodem bepaalt voor een groot deel hoe ver het effect van het kanaalpeil in de nabije omgeving van het kanaal reikt bij lage waterbodemweerstand. De scenario analyse van het maximale effect van baggerwerkzaamheden spitst zich daarom toe op de waterbodemweerstand.

4.4.2 Kalibratie lokale model

Het verfijnde model is stationair gekalibreerd op basis van de metingen op en rondom het perceel van het prioriteitspand. Het model is daarom vooral geschikt voor uitspraken rondom dit pand. Een vertaling van de effecten naar andere locaties langs het kanaal kan worden gedaan op basis van de gevoeligheidsanalyse in combinatie met de beschikbare gegevens over de variabiliteit in bodemopbouw langs het kanaal.

Op basis van de resultaten van bovenbeschreven gevoeligheidsanalyse is gekozen om bij de kalibratie te focussen op de volgende parameters:

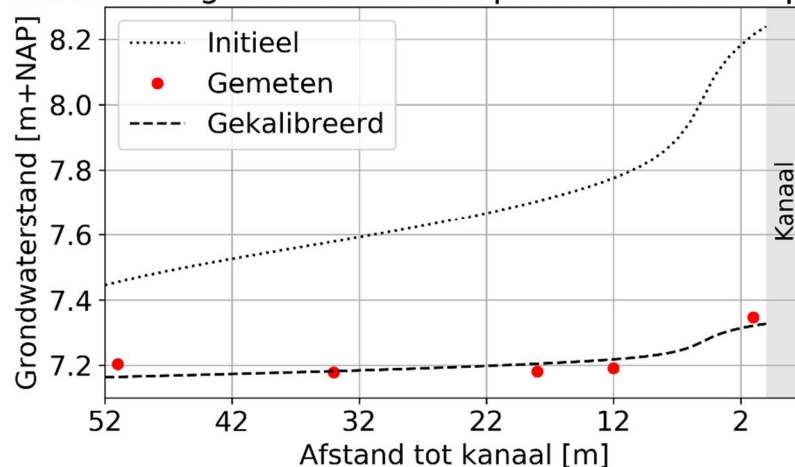
- Horizontale doorlatendheid (K_h) van de bodem rondom het kanaal (zand, klei, etc.).
- Weerstand van de kanaalbodem.

Op basis van expert judgement is door handmatig aangebrachte parameter variaties een verbetering van de initiële parameterwaarden gevonden. Hierbij is gekeken naar het verval ten opzichte van het kanaal en de gradiënt in de grondwaterstanden met afstand van het kanaal. De resultaten van deze kalibratie staan weergegeven in Tabel 4.4 en Figuur 4.20. Het gekalibreerde model is representatief voor de huidige situatie bij het prioriteitspand, ruime tijd na de laatste keer baggeren. Er lijkt op dat moment een relatief hoge weerstand in de kanaalbodem aanwezig te zijn. Verder bleek het noodzakelijk om de Kh waarden te verhogen. Gezien de geringere invloed van de Kh bij een hoge kanaalbodemweerstand (Figuur 4.18) blijft deze waarde echter onzeker. Een verhoging van de Kh levert echter wel een grotere uitstraling van de grondwaterstandsverhoging op (Figuur 4.19).

Tabel 4.4 Model waarden voor en na kalibratie

Parameter		Start waarde	Gekalibreerde waarde
K _h -waarde [m/dag]	Grof zand	10	20
	Fijn Zand	5	10
	Zand mix	0.5	5
	Silt mix	0.2	2.
	Veen	0.1	0.5
	Klei	0.05	0.01
Weerstand [dag]	Kanaalbodem	10	80

Berekende grondwaterstand perceel Prioriteitspand



Figuur 4.20 Berekende grondwaterstanden op een diepte van 5 meter onder maaiveld bij het perceel van het prioriteitspand voor en na kalibratie

Vergelijking met metingen

Een grondwaterstand van NAP +7.2 m is vergelijkbaar met de zomergrondwaterstanden in de peilbuizen 3 en 4, die zich op 12 m van het kanaal bevinden. Wat opvalt is het vlakke verloop van de grondwaterstand, dat ook zichtbaar is in peilbuis 9a en 9b (22 m en 41 m van het kanaal). Voor de raaien van peilbuizen 10a, 10b en 10c en peilbuizen 11a, 11b, en 11c geldt dit niet. Voor zowel peilbuis 10a als 11a geldt dat het verschil met 10b en 11b circa 60 cm is. Afwijkende

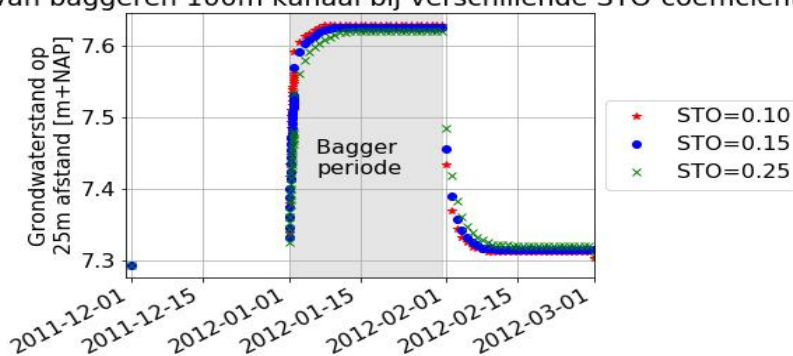
drainagesituaties zijn een mogelijke verklaring voor dit verschil. Een andere verklaring is dat de kanaalbodemweerstand lokaal kleiner is. Indien dat het geval is, dan zou het effect van het wegnemen van de kanaalbodemweerstand bij baggeren op die locaties kleiner zijn.

4.4.3 Lokale model geschikt maken voor tijdsafhankelijke berekeningen

De stationaire resultaten van het model geven feitelijk de maximale stijging die kan ontstaan door het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren. Zoals aan het begin van dit hoofdstuk uitgelegd, is het aannemelijk dat de bodem van het kanaal na een bepaalde tijd zal dichtslaan, waardoor er niet genoeg tijd is voor het grondwater om tot dit maximale niveau te stijgen. Om meer gevoel te krijgen voor de tijd die daarvoor nodig is, is het model aangepast om ook tijdsafhankelijke resultaten te kunnen leveren. Het model is ingesteld voor de periode 2011 t/m 2013, waarbij afhankelijk van het gekozen scenario de tijdstappen binnen één modelrun kunnen variëren tussen uurlijks tot maandelijks (uurlijks bijvoorbeeld rondom baggerwerkzaamheden).

Om tijdsafhankelijk te kunnen rekenen is een bergingscoëfficiënt aan het model toegevoegd middels de iMod STO package. In werkelijkheid zal de bergingscoëfficiënt afhangen van de bodemopbouw en van de diepte van de grondwaterstand onder maaiveld en derhalve zowel lokaal als in de tijd variëren. Om een idee te krijgen van de invloed van deze parameter op de rekenresultaten is het model getoetst voor waarden van de bergingscoëfficiënt variërend tussen 0,10, 0,15 en 0,25. Dat zijn voor deze locatie realistisch gemiddelde waarden. In de modelberekeningen is de weerstand van de kanaalbodem gedurende de maand januari 2012 weggelaten over een afstand van 100 m rondom het prioriteitspand. De resultaten laten zien dat de gevoeligheid van de bergingscoëfficiënt klein is en zich beperkt tot de eerste periode na het veranderen van de bodemweerstand (Figuur 4.21). Na een week is er al geen duidelijk verschil meer te zien. Voor het gebruikte tijdsafhankelijke model is daarom gekozen voor een bergingscoëfficiënt van 0,15.

Effect van baggeren 100m kanaal bij verschillende STO-coëfficiënten



Figuur 4.21 Modelresultaten bij gebruik van verschillende waarden voor de bergingscoëfficiënt voor de grondwaterstand op 25 m vanaf het kanaal nabij het prioriteitspand. In deze model run is de weerstand van de kanaalbodem gedurende de maand januari 2012 weggelaten over een afstand van 100 m rondom het prioriteitspand

4.5 Analyse casus

4.5.1 Scenario's voor en direct na het baggeren

Het lokale model voor het prioriteitspand wordt representatief geacht voor de situatie enkele jaren na baggeren (juni 2019). De gevoeligheidsanalyse en de kalibratie wijzen uit dat de intreeweerstand van de kanaalbodem de belangrijkste modelparameter is voor wat betreft verhogingen van de grondwaterstand in de omgeving van het kanaal.

Met behulp van scenario berekeningen is geanalyseerd wat het effect van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren is op de grondwaterstand.

Zoals in het begin van dit hoofdstuk is uitgelegd, zal elke dag een gedeelte van het kanaal zijn gebaggerd en zal door de waterbeweging in het kanaal voldoende zwevend slib aanwezig zijn om het deel dat de voorgaande dagen gebaggerd is relatief snel dicht te laten slibben. Het gevolg hiervan is een pulserende verandering in de grondwaterstand, net voor, tijdens en na het baggeren, die vooral in natte perioden tot overlast kan hebben geleid.

De periode van de werkzaamheden is bepaald aan de hand van de notulen van de bouwvergaderingen en de peildatum. Een overzicht is gegeven in Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Periode van de werkzaamheden.

Fase	Vakken	Traject	Afstand [m]	Periode	Aantal werkdagen	Voortgang [m/werkdag]
1	40-50	Bergentheim-Harderberg	5300	sept 2011 - maart 2012	129	41.1
	23-39	Vroomshoop-Bergentheim	6350	jan 2012 - 17 okt 2012	202	31.4
2	1-14	Almelo-Vriezenveen	6650	nov 2014 - 9 feb 2015	67	99.3
Beveiligd		Omgeving Vroomshoop	1000	10 nov 2015 - 11 apr 2016	105	9.5
			1000	Hoofdzakelijk voor kerst 2015	31	32.3

Met de volgende opmerkingen:

1. Het werk heeft stilgelegen tijdens bijv. mist, vorst, en andere momenten zoals vakantie: dit resulteert mogelijk in kleiner aantal effectieve werkdagen. Zo was er van eind januari tot half februari 2012 een periode met strenge vorst (Figuur 4.4).
2. De einddatum is strikt genomen de laatste datum: het is mogelijk dat de peiling bijvoorbeeld een week na afronden van het werk is uitgevoerd, maar niet ervóór. Dat resulteert in een kleiner aantal effectieve werkdagen.
3. Er is regelmatig op twee en later ook op drie plekken tegelijkertijd gebaggerd: dit resulteert mogelijk in grofweg een verdubbeling van het aantal effectieve werkdagen voor één locatie.

Het valt op dat vakken 1-14 veel sneller zijn uitgevoerd dan vakken 40-50 en 23-39. Het lijkt aannemelijk dat hier gedurende de hele periode op minstens twee locaties tegelijk is gewerkt. Maar stel in dat er in vakken 40-50 en 23-39 op twee locaties tegelijkertijd is gewerkt, dan resulteert dat in een snelheid van 15-20 m/werkdag. Dat lijkt bijna zeker een onderschatting. Voor vakken 1-14 is de snelheid 33-50 m/werkdag. Gezien opmerking 1 en 2 ligt de effectieve snelheid in werkelijkheid waarschijnlijk wat hoger.

In de volgende paragraaf wordt beschreven wat het effect is van het wegnemen van de kanaalbodemweerstand over een deel van het kanaal (40 tot 100 m).

De grondwaterstanden zijn berekend voor twee scenario's:

1. Situatie vóór het baggeren: feitelijk de kanaalbodem zoals die was in 2010.
2. Situatie direct na het baggeren: verlaging van de bodemweerstand naar 1 dag.

In scenario 1 is de geometrie van het kanaal is aangepast aan de situatie van 2010 (Figuur 4.12), dus vóór het baggeren. In scenario 2 zijn grondwaterstandsveranderingen direct na het baggeren berekend door de weerstand van de kanaalbodem te verlagen naar 1 dag over de gehele breedte van het kanaal.

Omdat de geohydrologische condities langs het 30 kilometer lange kanaal niet overal exact gelijk zijn, is het waarschijnlijk dat het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren niet overal hetzelfde effect op de grondwaterstand heeft gehad. Over de gehele lengte van het kanaal komen variaties voor in bodemopbouw. Zo is het 1^e watervoerend pakket dunner en grofzandiger tussen Almelo en Vroomshoop dan in het gebied ten noorden van Vroomshoop. De gevoeligheidsanalyse geeft aan dat een hogere horizontale doorlatendheid zorgt voor een kleinere grondwaterstandsverhoging direct naast het kanaal en dat de verhoging wel over een groter gebied plaatsvindt. Naast variatie in de bodemopbouw kan ook de weerstand van de kanaalbodem voor en na het baggeren over de lengte van 30 kilometer hebben gevarieerd. Dit zorgt er ook voor dat het werkelijk opgetreden effect van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren op de grondwaterstanden per locatie verschillend kan zijn geweest. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse kunnen worden gebruikt als eerste indicatie voor mogelijke verschillen in effect.

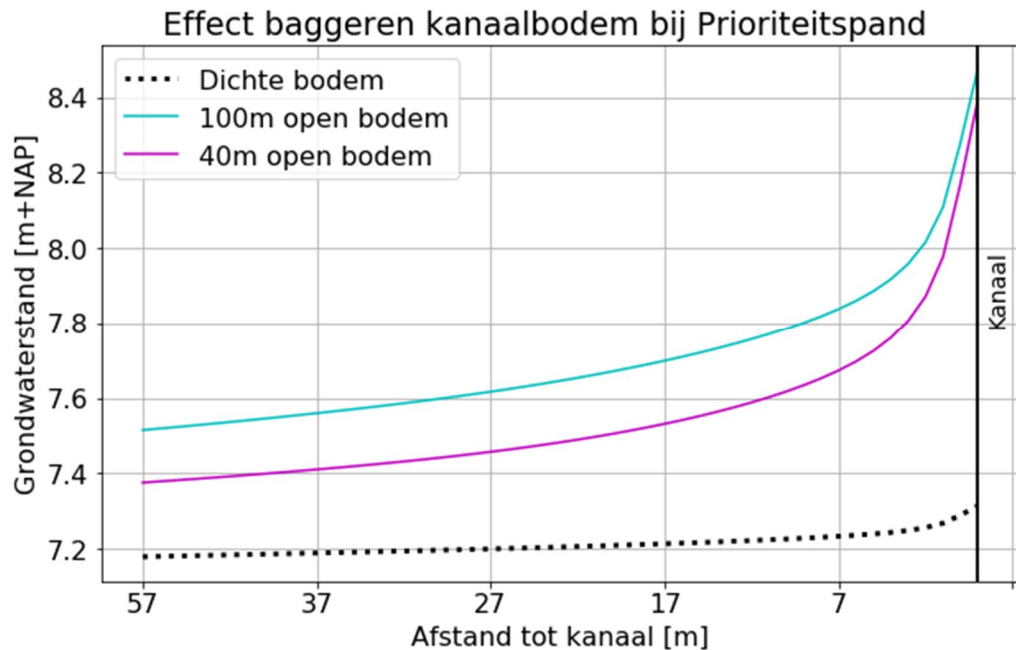
4.5.2 Effect van verwijderen van de bodemweerstand

In de gevoeligheidsanalyse is gebruik gemaakt van stationaire berekeningen. Bij het testen van de gevoeligheid voor de bodemweerstand is deze voor de gehele lengte van het kanaal verlaagd. Omdat het waarschijnlijk is dat het kanaal na baggeren weer vrij snel dichtslaat door ingezogen zwevend slib materiaal, zal deze stationaire toestand in werkelijkheid niet optreden. De baggerwerkzaamheden van het kanaal zijn uitgevoerd over een periode van vele maanden, waarbij per dag een bepaalde strook van het kanaal is afgewerkt. In de reeds gebaggerde delen van het kanaal zal de weerstand dan weer toenemen, waarmee de infiltratie naar de omgeving afneemt. Om inzicht te verkrijgen in het effect van een open kanaalbodem zijn berekeningen uitgevoerd waarbij in het model over een strook van 40 dan wel 100 meter de bodemweerstand is verlaagd naar 1 dag en de rest van het kanaal onveranderd blijft (80 dagen).

Figuur 4.22 laat de berekende stijging van de grondwaterstand zien van een stationaire modelberekening, waarbij de bodemweerstand bij het prioriteitspand over een lengte van 100 m is verwijderd. De stationair berekende stijging van het grondwater bij het prioriteitspand ter hoogte van het pand, dat op 25 m van het kanaal begint, is 44 cm (Figuur 4.23). Bij een verwijderde bodemweerstand over 40 m is de berekende stijging bij het prioriteitspand met 28 cm zo'n 16 cm minder groot. Dichter bij het kanaal is de stijging groter: bij een gat van 40 m bedraagt de stijging op 10 m circa 41 cm bij een gat van 100 m bedraagt de stijging op 10 m circa 58 cm.



Figuur 4.22 Het effect van bodemweerstand verlaging van een strook van 100 meter



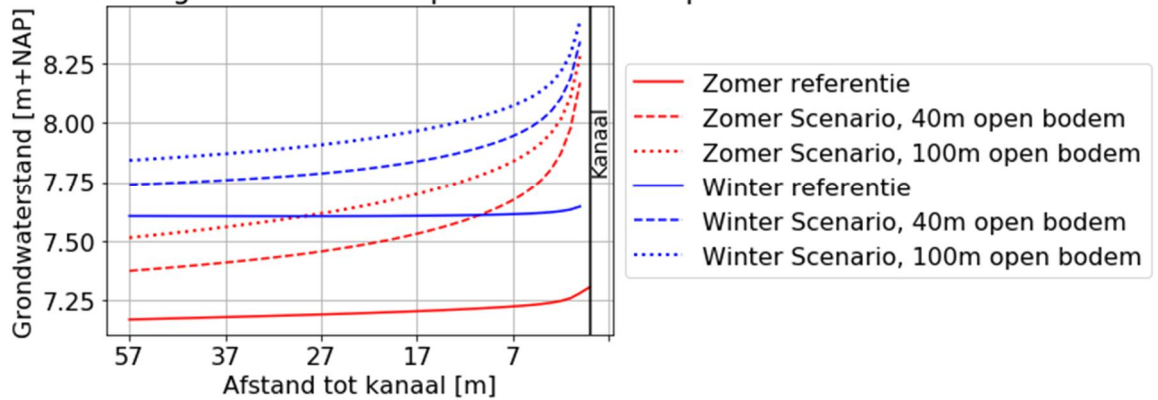
Figuur 4.23 Verskil in het effect van bodemweerstand verlaging voor een strook van 100 m respectievelijk van 40 meter

4.5.3 Verskil in optredend effect tussen zomer en winter situatie

Voor de berekeningen is uitgegaan van een stationaire zomer situatie waarbij er geen grondwateraanvulling (neerslag – verdamping) aan het model toegevoegd. Dit zorgt ervoor dat de grondwaterstanden relatief laag zijn, waardoor het effect van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren op de grondwaterstanden maximaal zal zijn. In een wintersituatie, waarbij grondwaterstanden al relatief hoog zijn, zal de stijging van de grondwaterstand minder groot zijn doordat hoge grondwaterstanden worden afgetopt door drainage.

Om toch een gevoel te krijgen van dit verschil is ook een berekening uitgevoerd voor een wintersituatie. Hiervoor is zoveel grondwateraanvulling (6 mm/dag) aan het model toegevoegd dat in een stationair model grondwaterstanden worden bereikt, die in deze regio representatief voor een natte periode (Figuur 4.2). Net als in een natte wintersituatie liggen de grondwaterstanden in het model dan 40 tot 80 centimeter hoger dan in de zomer. Bij deze grondwateraanvulling en grondwaterstanden is de grondwaterstijging als gevolg van het baggeren kleiner, omdat het peilverschil met het kanaal minder groot is. Deze winter- en zomersituatie zijn een indicatie van de onder- en bovengrens van de grondwaterstijging door het baggeren. Figuur 4.24 geeft het berekend effect hiervan.

Berekende grondwaterstand perceel Prioriteitspand

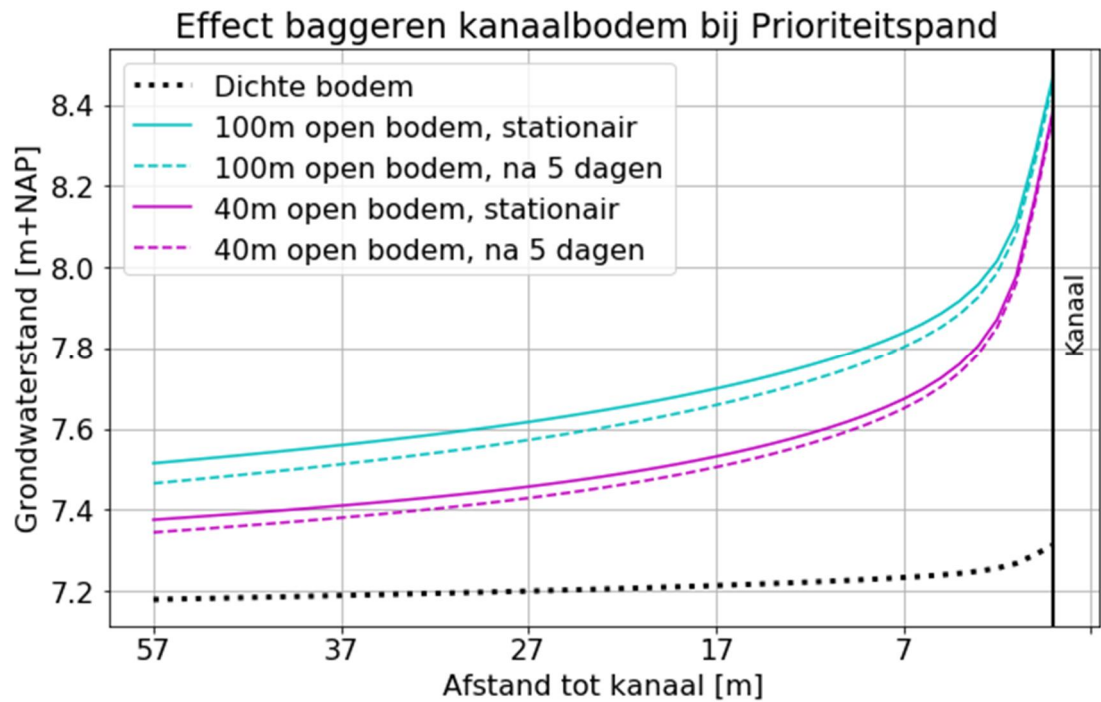


Figuur 4.24 Effect van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren van 40 en 100m kanaal in de zomer en winter nabij het prioriteitspand

De berekende stijging van de grondwaterstand als gevolg van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren komt afhankelijk van de locatie, de afstand tot het kanaal en de lengte van de open bodem in de natte wintersituatie ongeveer 10 tot 15 cm lager uit dan in de droge zomersituatie. De absolute waarden van de berekende grondwaterstanden zijn in de winter wel duidelijk hoger dan in de zomer. Dat betekent dat er in een natte periode een grotere kans is op het optreden van extra grondwateroverlast in tuinen en kelders ten gevolge van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren.

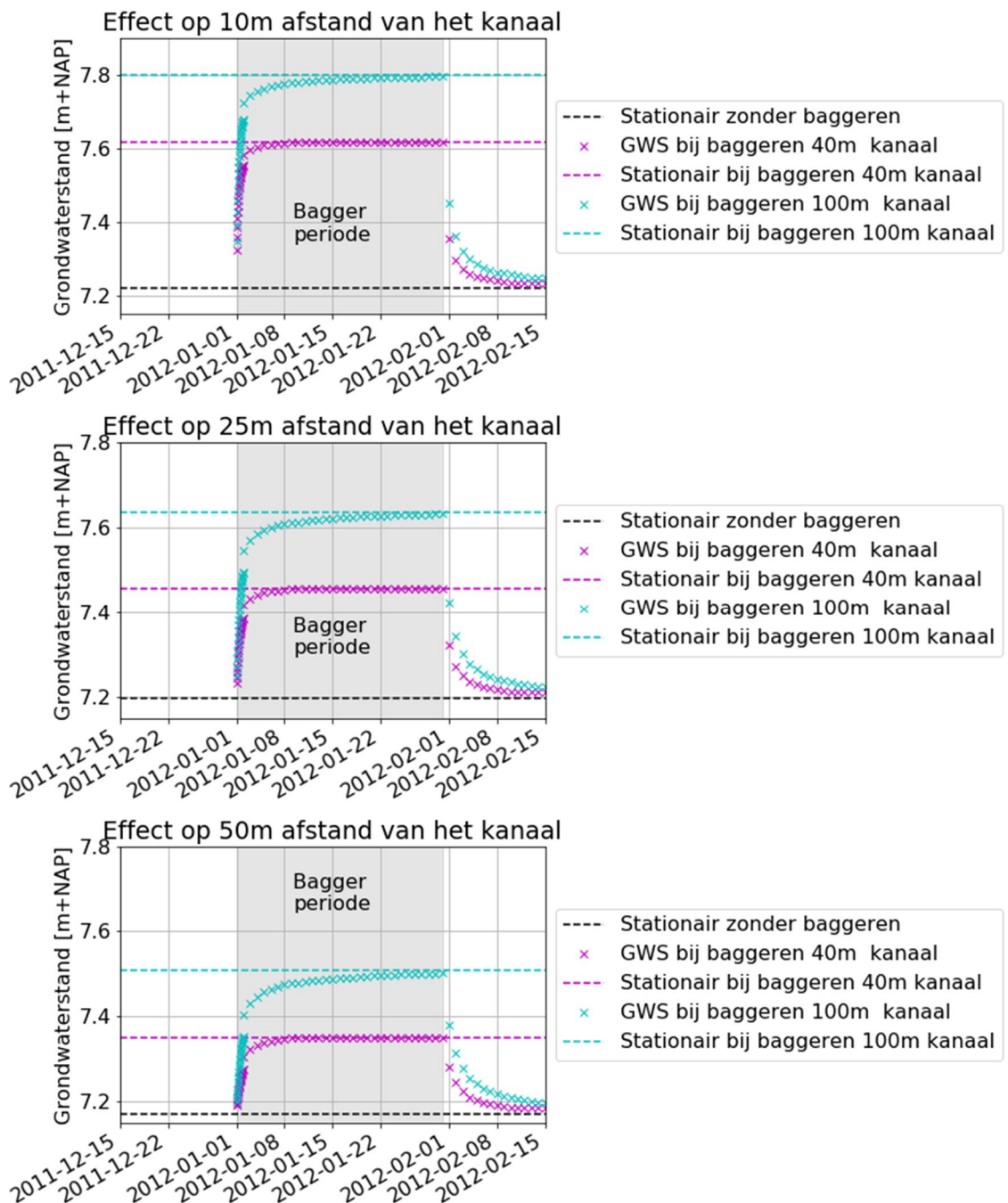
4.5.4 Effecten baggeren bij tijdsafhankelijk model

De stationaire resultaten van het model geven de maximale stijging die kan ontstaan door het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren. Doordat de bodem van het kanaal waarschijnlijk weer snel is dichtgeslagen, is deze maximale stijging niet gehaald. Immers, hoe korter de tijd dat de bodem van het kanaal open blijft, hoe minder tijd er is voor het kanaalwater om door de bodem naar de omgeving te stromen. Met het tijdsafhankelijke model is onderzocht wat het effect van het kortdurend weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren is. Hiervoor zijn drie scenario's gedraaid waarbij de weerstand van de kanaalbodem gedurende een maand is weggenomen over een afstand van 40 m en 100 m. Figuur 4.25 laat zien dat bij een traject van 40 m of 100 m kanaallengte de grondwaterstand al na 5 dagen bijna maximaal (stationair) gestegen is. Bij volledige kanaal is het verschil met de maximaal mogelijke stijging iets groter.



Figuur 4.25 Grondwaterstanden ter hoogte van het prioriteitspand bij baggeren van het kanaal zowel 5 dagen na het baggeren als na langere tijd (stationair)

Figuur 4.26 laat de tijdsafhankelijk berekende grondwaterstand zien op een afstand van 10 m, 25 m en 50 m vanaf het kanaal, ter hoogte van het prioriteitspand. Te zien is dat op deze afstanden de maximale stijging bereikt wordt na 1 tot 2 weken. Dit betekent dat indien het kanaal binnen deze tijd weer dichtslaat, de grondwaterstijging kleiner dan de maximale stijging zal zijn. Naarmate de lengte waarover de bodem “open” is korter wordt, wordt de maximale stijging eerder benaderd.



Figuur 4.26 Tijdsafhankelijke grondwaterstanden ter hoogte van het prioriteitspand bij het baggeren van het kanaal

4.5.5 Tijdsafhankelijke resultaten met bewegend baggerfront

Uit de eerdere modelberekening met een gat in de sliblaag van 40 m of 100 m blijkt dat de stijging van de grondwaterstand lager is als een kleiner deel van het kanaal open ligt. De grootte van dit gat is mede afhankelijk van de verstoppingssnelheid: als binnen één dag de sliblaag hersteld is, dan is de maximale lengte van het gat gelijk aan de lengte die in één dag gebaggerd is.

Er zijn aanvullende modelberekeningen uitgevoerd om inzicht te krijgen in het effect van een bewegend baggerfront in combinatie met de variatie in de duur van het dichtslaan van de sliblaag van de kanaalbodem. Op basis van bovenstaande gegevens is hiervoor uitgegaan van een baggersnelheid van 40 m per werkdag. Vervolgens zijn de volgende tijdsafhankelijke scenario's gedefinieerd:

1. Verstopping in 1 dag, met een lengte van 40 m. Dit is de meest waarschijnlijke situatie.
2. Verstopping in 1 week, met een lengte van 200 m (uitgaande van 5 werkdagen). Dit lijkt al vrij onwaarschijnlijk, maar het kan niet bewezen worden dat het niet mogelijk is.
3. Verstopping in 1 maand, met een lengte van 800 m (uitgaande van 20 werkdagen). Dit is zeer onwaarschijnlijk, maar toch meegenomen om de gevoeligheid aan te tonen.

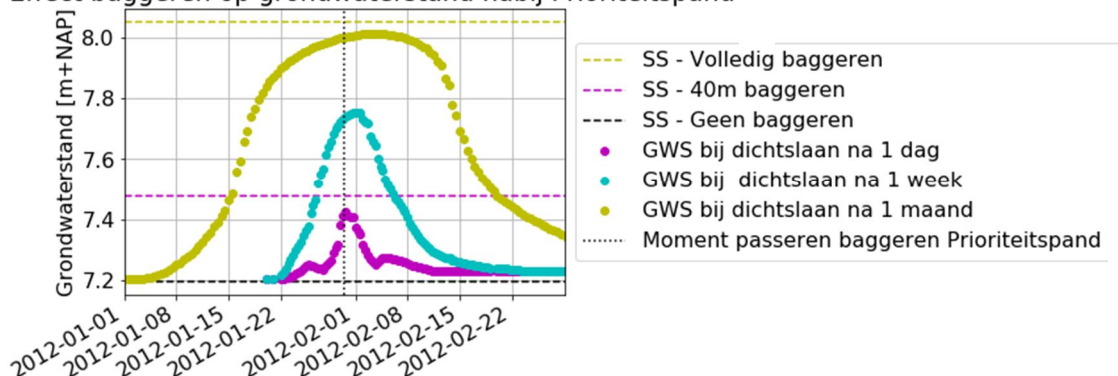
Het doel van deze berekening is om inzicht te verschaffen in de spreiding van mogelijke grondwaterstandsverhoging, niet om met maximale complexiteit de grondwaterstandstanden bij de baggerwerkzaamheden te berekenen. Om de complexiteit van de berekeningen te beperken zijn de volgende aannames gedaan:

1. Geen grondwateraanvulling.
2. Instantaan wordt de kanaalbodemweerstand verlaagd naar 1 dag. Gedurende de periode neemt de weerstand niet toe.
3. Kanaalbodem verandert niet. Zowel voor als na het baggeren wordt daarvoor de situatie van 2016 gebruikt.

Bij scenario 1 is rekening gehouden met de weekenden: gedurende 5 dagen verschuift het gat in de sliblaag 40 meter per dag, en doordat dit gat na 1 dag dichtslaat is er gedurende het weekend geen gat in de sliblaag aanwezig. Voor scenario's 2 en 3 is een versimpeling toegevoegd en verschuift het baggerfront 28,5 meter per dag, op basis van 40 meter per dag over 5 van de 7 dagen in de week.

Figuur 4.27 laat de berekende grondwaterstanden zien bij het prioriteitspand op 25 m afstand van het kanaal. Naarmate de bodem van het kanaal na het baggeren sneller weer dichtslaat zal de stijging van de grondwaterstand kleiner zijn dan berekend met het stationaire model. Een opvallend effect treedt op bij het stilliggen van de werkzaamheden op de grondwaterstanden (scenario met dichtslaan na 1 dag): doordat de kanaalbodem niet meer open ligt in het weekend zal de grondwaterstand op die dagen dalen en is het effect van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren niet één duidelijke stijging, maar een aaneenschakeling van stijgen en dalen. Verder geldt voor alle drie scenario's dat de stijging (en vervolgens daling) veel geleidelijker in de tijd is. Dit komt doordat de locatie van het gat in de kanaalbodem langzaam het prioriteitspand nadert en vervolgens passeert. In het hypothetische geval dat de kanaalbodem 1 maand open blijft en er dus een gat van ongeveer 800m in de kanaalbodem aanwezig is, zal de maximale tijdsafhankelijke stijging van het grondwater bijna gelijk zijn aan de stationaire stijging bij een situatie met een open kanaalbodem over de volledige lengte van het kanaal.

Effect baggeren op grondwaterstand nabij Prioriteitspand



Figuur 4.27 Grondwaterstandsverandering op 25 m afstand van het kanaal als gevolg van het passeren van de baggerwerkzaamheden bij het prioriteitspand met een snelheid van 40 m per werkdag. Voor alle scenario's ligt het baggerfront precies bij het prioriteitspand in het midden van het figuur op 30 januari. SS is de stationaire situatie voor de diverse scenario's

4.5.6 Evaluatie van de verschillen tussen berekeningen en metingen

De resultaten van deze berekeningen tonen aan dat de grondwaterstijging als gevolg van het baggeren zich waarschijnlijk over een periode van meerdere dagen afspeelt. In dat geval zou een stijging door het baggeren in de metingen zichtbaar moeten zijn. Deze stijging is bij de aanwezige peilbuizen in 2011-2012 niet geobserveerd, zoals in paragraaf 4.2.3 is geconcludeerd.

De met het model berekende grondwaterstijgingen lijken relatief groot te zijn ten opzichte van de metingen. Twee plausibele redenen daarvoor zijn: 1. de verstoppingsperiode in het grondwatermodel bedraagt ten minste een dag en is in werkelijkheid mogelijk veel korter; 2. een gemeten stijging is gelijktijdig opgetreden met dan wel onterecht toegewezen aan neerslag. Ten onrechte toewijzen van neerslag aan een stijging van de grondwaterstand kan optreden omdat het KNMI neerslag station, dat in het model is gebruikt, op meerdere kilometers vanaf het kanaal ligt. Het kan dus voorkomen dat neerslag wordt waargenomen die niet op de locatie valt. Dat is echter in de baggerperiode waarschijnlijk niet opgetreden, omdat de neerslagpieken in die periode in alle meetpunten lijken voor te komen, wat indiceert dat de neerslag op grote schaal is voorgekomen.

De gehanteerde verstoppingsperiode van een dag betekent dat de bodem van het kanaal in het model ten minste 24 uur over 40 m (of 100 m) open ligt. Uitgaande van een werktijd van 10 uren per dag, wordt er gemiddeld over een lengte van 4 m (of 10 m) per uur de sliblaag met hydraulische weerstand weggehaald. Door het baggeren komt er veel fijn zwevend slibmateriaal in het kanaalwater terecht. Dit fijne materiaal wordt met het uitstromende water mee de grond in gezogen, waardoor de relatief grote poriën in de zandbodem dichtslibben, en de hydraulische weerstand weer toeneemt. Dit is geen lineair proces. Initieel is de weerstand klein, en de flux groot. Naarmate de weerstand toeneemt, neemt de flux af en zullen er minder fijne deeltjes indringen. Het is dus te verwachten dat de weerstand initieel relatief snel toeneemt, en vervolgens steeds langzamer. Bij een werktijd van 10 uur heeft het water 14 uur om tot rust te komen. Dit proces is niet gesimuleerd: de kanaalbodem ligt in het model gedurende een volledige dag open over de complete afstand die in 1 dag gebaggerd is. Dit resulteert in grotere grondwaterstijgingen dan wanneer het verstoppingsproces veel sneller optreedt.

Indien het baggeren bij een meetpunt gelijktijdig met neerslag is opgetreden, dan is te verwachten dat dit een grotere stijging veroorzaakt dan vanuit neerslag alleen valt te verwachten. De korte duur van de tijdseries sluiten een robuuste tijdserie-analyse echter uit. Bovendien kan de hoeveelheid neerslag die bij het weerstation gevallen is afwijken van de neerslag die lokaal bij het meetpunt gevallen is. Het zou dus kunnen dat een grondwaterstijging ten gevolge van het wegnemen van de sliblaag bij het baggeren wordt gemaskeerd door neerslag. Qua grootte zijn de

waargenomen stijgingen in de meetpunten echter niet uitzonderlijk (Figuur 4.2): lange tijdseries (Figuur 4.10) laten een vergelijkbare (natuurlijke) variatie in grondwaterstanden zien.

4.6 Samenvatting en conclusies grondwater

De algemene bevindingen en conclusies zijn:

- Verhoging van grondwaterstanden kan tot twee problemen leiden: grondwateroverlast zoals natte kruipruimtes en opkruipend vocht, en schade aan funderingen door differentiële zetting wanneer niet eerder voorgekomen grondwaterstanden worden bereikt.
- Bij de baggerwerkzaamheden is het plausibel dat de grondwaterstand tijdelijk (gedurende enkele uren tot enkele dagen) is verhoogd. De opbouw van weerstand na het baggeren ontstaat door het dichtslaan van poriën in de bovenste laag van de waterbodem. Bij grote infiltratiefluxen en veel zwevend materiaal kan zo'n laag zich snel vormen.
- Uit zowel de grondwaterstandmetingen uitgevoerd tijdens de baggerwerkzaamheden als uit metingen van regionale meetnetten is geen grondwaterstandsverhoging over langere periodes waar te nemen, die niet aan neerslag valt toe te wijzen. Dat betekent dat een stijging van de grondwaterstand door het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren niet uit de metingen kan worden afgeleid.
- Het is mogelijk dat de metingen niet volledig representatief zijn voor het gehele gebied, of dat door de meetfrequentie van een dag van de grondwaterstanden een relatief kleine, kortstondige stijging niet is gemeten. Om deze reden is een grondwatermodel opgesteld om eventuele effecten te onderzoeken.

4.6.1 Bevindingen en conclusies ten aanzien van casus van het prioriteitspand

- Uit de gevoeligheidsanalyse van de relevante modelparameters blijkt dat de kanaalbodemweerstand verreweg de meest bepalende parameter in het model is voor mogelijke stijging van de grondwaterstand door baggeren van de kanaalbodem.
- Uit de metingen van juni 2019 nabij het prioriteitspand blijkt een groot verschil tussen kanaalwaterstand (NAP +9,1 m) en grondwaterstand direct naast het kanaal (NAP +7,35 m). Dit betekent dat er op het moment van meten een grote hydraulische weerstand moet zijn geweest tussen het kanaal water en het grondwater in de omgeving.
- Uit stationaire berekeningen voor een zomersituatie blijkt dat de stijging afneemt met afstand tot het kanaal, en de lengte waarover de sliblaag van de kanaalbodem is verwijderd. Bij een gat van 40 m bedraagt de berekende stijging op 10 m afstand 41 cm, en op 25 m afstand 28 cm. Bij een gat van 100 m bedraagt de berekende stijging op 10 m afstand 58 cm, en op 25 m afstand 44 cm (Figuur 4.23).
- Uit stationaire berekeningen voor een wintersituatie blijkt dat de stijging kleiner is, door een kleiner peilverschil tussen kanaal en omgeving en eventueel actieve drainage. Dit scheelt ongeveer 10 cm. De absolute grondwaterstand zal wel hoger zijn dan in de zomer.
- Een stationaire situatie komt overeen met oneindig lang instromen van kanaalwater naar de omgeving, waarbij een evenwichtssituatie met de omgeving wordt bereikt. In werkelijkheid neemt de weerstand van de kanaalbodem weer toe voordat deze stationaire grondwaterstijging wordt bereikt.
- De benodigde tijd om deze theoretisch maximaal haalbare stationaire stijging te bereiken wordt kleiner naarmate de lengte van het traject waarover de bodemweerstand van het kanaal is verwijderd korter wordt. Voor een traject van 40 m is dat al binnen 1 à 2 weken het geval. Voor een traject van 100 m duurt dat iets meer dan een maand. Gedurende de eerste paar dagen wordt het overgrote deel van de maximale stijging gerealiseerd (Figuur 4.25 en Figuur 4.26).
- Het tijdsafhankelijke effect van de in lengterichting van het kanaal voortschrijdende baggerwerkzaamheden resulteert in een stijging en daarna weer daling van de grondwaterstand. De maximale tijdsafhankelijk berekende stijging bij het prioriteitspand bij

een voortgang van 40 m per dag en het open blijven van de bodem gedurende 1 dag bedraagt 23 cm, versus 28 cm in de stationaire berekening.

- De berekeningen benadrukken dat een aanzienlijke grondwaterstijging ter hoogte van de peilbuizen in de metingen zichtbaar had moeten zijn. Uit de combinatie van de berekeningsresultaten en de gemeten stijghoogte (peilbuis 4) kan niet worden afgeleid wanneer de baggerwerkzaamheden in de periode oktober 2011 – december 2012 ter hoogte van het prioriteitspand hebben plaatsgevonden. Ook combinatie van de berekeningen en de metingen van de ca 750 m noordelijker gelegen peilbuizen 11a, b en c kan dat niet worden afgeleid. Dat kan erop duiden dat de bodem van het kanaal na baggeren ter hoogte van beide locaties weer zo snel is dichtgeslagen dat er geen meetbare stijging van de grondwaterstand is opgetreden, in ieder geval geen langdurige stijging, of dat de meetfrequentie gedurende deze periode (1 meting per dag) te kort is om een tijdelijke stijging van de grondwaterstand op deze locaties aan te tonen. Beide mogelijkheden wijzen in de richting van een zeer tijdelijke stijging van beperkte grootte, die niet valt te onderscheiden van stijgingen die zijn veroorzaakt door neerslag. Een stijging van de grondwaterstand bij het prioriteitspand op circa 25 m afstand van het kanaal door baggeren, die groter is dan orde 20 cm lijkt daarom onwaarschijnlijk, zeker gezien de afwezigheid van een dergelijk signaal in de metingen.
- Lekkage van damwanden kan een permanente grondwaterstandsverhoging tot gevolg hebben, direct rondom de lekkage. De verwachte maximale verhoging van de grondwaterstand door een lekkende damwand op 8 m van de lekkage ligt in de orde van 20 centimeter. Op 25 m afstand is daar nog minder dan de helft van over. In tegenstelling tot een mogelijk tijdelijke stijging door open maken van de kanaalbodem door baggeren, blijft een mogelijke stijging van grondwater door lekkage in een damwand aanwezig zolang het lek niet gedicht wordt.
- Door het baggeren van de sliblaag op de kanaalbodem kan bij alle panden in de directe omgeving van het kanaal een kleine stijging van de grondwaterstand zijn voorgekomen gedurende een periode van hooguit enkele dagen. In natte perioden kan deze stijging geleid hebben tot een tijdelijke toename van de wateroverlast.

4.6.2 Bevindingen en conclusies ten aanzien van effecten langs het kanaal in de ruimere omgeving van Vroomshoop (circa 3 km vanaf het prioriteitspand, gemeten langs het kanaal)

- De aanwezigheid van permanent watervoerende sloten of vaarten heeft een sterk dempend effect op de variatie van de grondwaterstand tijdens droge (zomer)perioden, terwijl de aanwezigheid van drainage dempend werkt in natte (winter)perioden. Omgekeerd bij het ontbreken daarvan is de grondwaterstand aan grotere variatie onderhevig.
- Het is niet uit te sluiten dat baggeren van andere delen van het kanaal, waar mogelijk andere bodemcondities gelden, heeft geleid tot grotere stijgingen van de grondwaterstand dan bij het prioriteitspand. Op basis van de resultaten van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse kan worden geconcludeerd dat stijging van de grondwaterstand door het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren op andere locaties op 25 m afstand van het kanaal ongeveer 50% groter kan zijn geweest dan bij het prioriteitspand. Dit wordt veroorzaakt door afwijkende doorlatendheden van de ondergrond, een afwijkende drainagesituatie, of een langere periode voordat de kanaalbodemweerstand weer is toegenomen.
- Een deel van de panden langs het kanaal bevindt zich op een kleinere afstand dan 25 m. Hierbij geldt: hoe dicht bij het kanaal, hoe groter de mogelijke stijging.
- De gemiddelde baggersnelheid voor de periode 2011 en 2012 bedraagt circa 40 m per dag. De grootste gemiddelde snelheid bedraagt circa 100 m per dag. Hierbij geldt: hoe groter de lengte waarover de sliblaag in een korte tijd verwijderd is, hoe groter de mogelijke stijging.
- De panden die zich dichtbij het kanaal bevinden, en waar in de winter met grote snelheid gebaggerd is, hebben de grootste kans op schade gelopen. In de winter is de potentiële stijging wel kleiner dan in de zomer.

- Op basis van alle beschikbare metingen, uitgevoerde berekeningen (inclusief alle onzekerheden en aannames daarin) en onze geohydrologische expertise achten wij het onwaarschijnlijk dat er, in een natte periode met al hoge natuurlijke grondwaterstanden, stijgingen zijn opgetreden die groter zijn dan 20 cm op 25 m afstand van het kanaal en 45 cm op 8 m afstand van het kanaal. Indien er sprake is van een groot lek in een van de damwanden, kan daar op 8 m afstand van het kanaal ongeveer 20 cm stijging bijkomen.
- Door het baggeren van de sliblaag op de kanaalbodem kan bij alle panden in de directe omgeving van het kanaal een kleine stijging van de grondwaterstand zijn voorgekomen gedurende een periode van hooguit enkele dagen. In natte perioden kan deze stijging geleid hebben tot een tijdelijke toename van de wateroverlast.
- Doordat de monitoring van grondwaterstanden tijdens het baggeren beperkt was, en met de huidige gegevens onbekend is wanneer nabij een specifiek pand is gebaggerd, is het niet mogelijk om de conclusies op pandniveau specifieker te maken.

5 Trillingen en veldmetingen

5.1 Context

Door de omwonenden is aangegeven dat bij de werkzaamheden aan het kanaal overlast van trillingen is ervaren. Tevens zijn trillingen als gevolg van de scheepvaart duidelijk voelbaar sinds de verbreding van het kanaal. Voordat het kanaal toegankelijk was voor schepen van 700 ton waren er, volgens de omwonenden veel minder, goed voelbare trillingen. Tevens is het hard sluiten van bruggen (met name de Puntbrug) als groot zorgpunt benoemd. Naar aanleiding hiervan zijn verschillende meetcampagnes op locatie uitgevoerd. Doel van deze campagnes en voorliggende analyse is onderzoeken of de opgetreden trillingen (mede) de oorzaak zijn van de schadebeelden.

5.2 Overzicht gevolgen van trillingen en de beoordeling

De trillingen die in dit rapport worden beschouwd zijn trillingen die in het pand optreden, maar waarvan de oorzaak buiten het pand ligt. Deze trillingen planten zicht voort van de plaats waar zij ontstaan door de ondergrond, via de fundering naar het pand toe en brengen het pand in trilling.

De trillingen in het pand kunnen voelbaar zijn en als hinderlijk worden ervaren door de gebruikers of de bewoners van een pand, of schade veroorzaken aan de constructie of de afwerking van het pand. Een trilling in de grond onder de fundering kan de draagkracht van de fundering aantasten, waardoor verzakkingen van en schade aan een constructie kunnen ontstaan. Daarnaast kunnen trillingsgevoelige (bedrijfs-)processen worden verstoord, of kunnen de trillende constructiedelen laagfrequent geluid afstralen, wat ook weer als hinderlijk kan worden ervaren. Deze laatste twee aspecten zijn in dit rapport niet beschouwd.

Voor de beoordeling mogelijk schade door trillingen is uitgegaan van de SBR-richtlijn deel A [7]. Deze richtlijn geeft grenswaarden voor het trillingsniveau waarbij de kans op schade klein is, orde 1%. Er zijn grenswaarden gegeven voor zowel schade aan de constructie doordat deze trilt (directe schade) als schade aan de constructie doordat de draagkracht van de fundering vermindert (schade aan de fundering, indirecte schade). Deze SBR-richtlijn maakt bij schade aan de constructie onderscheid tussen schade aan de draagconstructie en de schade aan niet-dragende delen. . Voor panden met een betonnen draagconstructie is dit onderscheid relevant. Bij panden in metselwerk wordt geen onderscheid tussen schade aan de draagconstructie en schade aan niet-dragende onderdelen gemaakt, omdat deze bij panden in metselwerk samenvallen.

Voor de beoordeling hinder door trillingen is uitgegaan van de SBR-richtlijn deel B [8]. Deze richtlijn geeft streefwaarden voor trillingen.

5.3 Overzicht meetcampagnes

Het betreft hier verschillende typen meetcampagnes, te weten:

- Onbemande trillingsmetingen aan een pand representatief voor de oudere, op staal gefundeerde panden langs het kanaal en twee nieuwe appartementencomplexen nabij de Puntbrug gedurende 1 week.
- Bemande trillingsmetingen langs de nieuwe appartementencomplexen nabij de Puntbrug gedurende 1 dag.
- Bemande trillingsmetingen en waterspanningsmetingen aan een prioriteitspand en in de ondergrond bij het pand gedurende 3,5 dagen.

- Onbemande trillingsmetingen en waterspanningsmetingen aan een prioriteitspand en in de ondergrond bij het pand gedurende 4 weken.
- Aanvullende onbemande trillingsmetingen in februari en maart 2020 ter hoogte van twee prioriteitspanden en een niet-prioriteitspand.
- Bemande trillingsmetingen bij het inbrengen van de vervangende damwanden in 2018-2019. Deze metingen zijn tijdens de verbreding van het kanaal uitgevoerd door de aannemer als er bij de wachtplaatsen nieuwe damwanden moesten worden geplaatst of extra verankeringen moesten worden aangebracht. De resultaten zijn gerapporteerd aan de provincie.

In dit rapport zijn deze metingen geanalyseerd en conclusies gegeven over de mogelijke bijdrage van de geïdentificeerde trillingsbronnen aan de schade. Tevens zijn ook de trillingsmetingen geanalyseerd, die in het verleden zijn uitgevoerd ten tijde van het plaatsen van de damwanden ten behoeve van de wachtplaatsen.

De analyse en conclusies zijn gebaseerd op de waarnemingen tot en met 8 maart 2020.

5.4 Leeswijzer

De volgorde in dit hoofdstuk is als volgt:

- Paragraaf 5.5 behandelt de resultaten van de onbemande trillingsmetingen aan een selectie van oudere, op staal gefundeerde panden en de nieuwe appartementencomplexen gedurende één week. Deze metingen geven een algemeen overzicht van de thans actieve trillingsbronnen, de sterkte van de trillingen en de variatie van de trillingssterkte.
- In paragraaf 5.6 worden de trillingsmetingen van de bemande meetcampagne langs de nieuwe appartementen complexen nabij de Puntbrug geanalyseerd om na te gaan of de thans aanwezige trillingen en het gesimuleerde klappen van het brugdek kunnen bijdragen aan het ontstaan van schade.
- In paragraaf 5.7 is de meetcampagne van de bemande metingen aan een prioriteitspand uitgewerkt. Hierbij is nagegaan of de trillingen hebben kunnen bijdragen aan de opgetreden schade en of de passages van (zwaar) wegverkeer en scheepvaart tot significante dynamische wateroverspanningen leiden. Deze dynamische waterspanningen kunnen invloed hebben op de stabiliteit van een fundering.
- In paragraaf 5.8 zijn de onbemande trillingsmetingen nabij een prioriteitspand uitgewerkt. In deze meetcampagne zijn de trillingsmetingen weliswaar hoogfrequent gemeten, maar alleen de karakteristieke waarden zijn bewaard als gevolg van de standaard meetapparatuur die is gebruikt. Deze monitoring is vooral bedoeld om inzicht te krijgen in de grootte van de trillingen gedurende de langere periode.
- In paragraaf 5.9 zijn de aanvullende onbemande trillingsmetingen aan twee prioriteitspanden en een niet-prioriteitspand uitgewerkt.
- Ten slotte zijn in paragraaf 5.10 de trillingsmetingen die in het verleden bij het aanbrengen van de damwanden t.b.v. de wachtplaatsen en de trillingsmetingen bij het inbrengen van de vervangende damwanden geanalyseerd.
- Paragraaf 5.11 geeft een samenvatting van de conclusies.

5.5 Onbemande trillingsmonitoring gedurende één week (mei 2019)

Deze paragraaf beschrijft de resultaten en analyse van de onbemande trillingsmetingen aan een selectie van oudere, op staal gefundeerde panden en de nieuwe appartementencomplexen in algemene zin.

Onderstaande figuur geeft een overzicht van de meetlocaties. De plaats van de opnemers op locaties met meer dan één meetpunt wordt bij de betreffende meting gespecificeerd.



Figuur 5.1 Overzicht locatie meetpunten (achtergrond figuur www.openstreetmap.org) van de onbemande trillingsmetingen aan een aantal panden gedurende één week

5.5.1 Doel van de monitoring

Deze monitoring heeft tot doel een algemeen overzicht te geven van de thans actieve trillingsbronnen, de sterkte van de trillingen en de variatie van de trillingssterkte.

5.5.2 Werkwijze en keuze meetpunten

Deze monitoring is gedurende één week uitgevoerd door Movares. Het rapport van Movares [6] is integraal opgenomen in Bijlage M. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de aanpak en de bevindingen.

De volgende trillingsopnemers zijn geplaatst rondom de Puntbrug in Vroomshoop, zie ook Figuur 5.2:

- Appartementengebouw A, prioriteitspand, muur schade (in de parkeergarage op de hoek, meetpunt 2).
- Appartementengebouw A, prioriteitspand, muur schade (in de parkeergarage bij de tussenmuur, meetpunt 3).
- Appartementengebouw A, prioriteitspand, appartement, vloer hinder (meetpunt 4).
- Appartementengebouw B, prioriteitspand, muur schade (meetpunt 5).
- Appartementengebouw B, prioriteitspand, vloer hinder (meetpunt 6).
- Pand D, muur schade (meetpunt 7).

De betreffende panden zijn door Deltares gekozen na overleg met een lid van de klankbordgroep [9]. De meetpunten aan de muur zijn bedoeld om het trillingsniveau te kunnen beoordelen op het aspect op schade, de meetpunten op de vloer zijn bedoeld om de trillingen te beoordelen op het aspect hinder.



Figuur 5.2 Locatie meetpunten bij de Puntbrug

Er is voor de montage in de kelder gekozen, zodat de opnemers veilig staan.

De nummers achter de meetpunten refereren naar de nummer die gedurende de werkzaamheden voor elk meetpunt zijn gebruikt.

Voor trillinghinder zijn op de volgende locaties tussen Vroomshoop en Mariënborg opnemers geplaatst:

- Pand A (Hardenberg net over de gemeentegrens) (meetpunt 9).
- Pand B (meetpunt 10).
- Pand C (meetpunt 11).

De plaats van deze panden zijn aangegeven in Figuur 5.1.

De betreffende panden zijn door Deltares gekozen na overleg met de heer Douwe Bouma, lid van de klankbordgroep [2]. Op basis van Google Maps zijn de meetpunten 10 en 11 locaties waar verkeersplateaus liggen. Hindermetingen zijn bedoeld om na te gaan in hoeverre de optredende trillingen voelbaar en hinderlijk zijn. Op veel plaatsen werd gesproken over hoge trillingen en klachten hierover. Als er een hoog trillingsniveau in deze panden heerst, kan dit betekenen dat er sprake is van een bijzondere situatie.

De metingen zijn uitgevoerd door Movares in de periode van 14-23 mei 2019.

Na de week onbemand meten zijn, zonder aanpassingen te hebben gemaakt aan de opstellingen van opnemers, in dezelfde hierboven genoemde appartementengebouwen rondom de Puntbrug bemande metingen uitgevoerd waarbij passages met een kraanwagen en een trekker met zwaarbeladen kieper als aanhanger zijn uitgevoerd. Deze passages zijn ook bedoeld om zeker te stellen dat de zwaarst belaste voertuigen in de meting aanwezig zijn. Tevens is het klappen van het brugdek gesimuleerd met een valgewicht. De resultaten van deze eendaagse bemande meetcampagne wordt beschreven in paragraaf 5.6.

5.5.3 Resultaten van de monitoring

Deze metingen zijn verwerkt, geïnterpreteerd en beoordeeld door Movares volgens de thans geldende SBR-richtlijnen A (schade) en B (hinder) [6]. Rapport [6] geeft meer details van de uitwerking dan dit hoofdstuk.

De opnemers in de meetpunten 3 (in de kelder van het appartementengebouw A) en meetpunt 11 (Pand C) hebben niet gefunctioneerd. Door problemen met de dataverbinding is dit probleem niet tijdig geconstateerd. Hiervan zijn geen resultaten beschikbaar. Ondanks deze tegenslag zijn er voldoende panden beschikbaar om een goede indicatie te krijgen van de beide aspecten.

5.5.4 Beoordeling van het aspect schade

De metingen in volgende punten zijn beoordeeld op het aspect schade:

- Appartementengebouw A, prioriteitspand, muur schade (in de parkeergarage in de hoek, meetpunt 2).
- Appartementengebouw B, prioriteitspand, muur schade (meetpunt 5).
- Pand D, muur schade (meetpunt 7).

Meetpunt 3 was een vergelijkbaar meetpunt als meetpunt 2, bedoeld om meer zekerheid te krijgen omtrent het trillingsniveau in het pand. Het wegvallen van dit meetpunt heeft geen invloed op de conclusies.

De beoordeling is uitgevoerd volgens de SBR-richtlijn deel A [7]. Beoordeeld wordt de maximale trillingssnelheid voor (het optreden van) schade aan de constructie en de maximale trillingssnelheid en de maximale versnelling voor (het optreden van) schade aan de fundering.

Voor de bepaling van de grenswaarden van de trillingen voor schade aan de constructie is uitgegaan van:

- Indeling van de panden in categorie 2: de constructie bestaat uit metselwerk. Voor de draagconstructie van één appartementengebouw is dit onjuist, dit gebouw heeft een draagconstructie van beton, waardoor een hogere waarde toelaatbaar is. De laagste waarde van de karakteristieke waarde is 5 mm/s, voor frequenties boven de 10 Hz is een hogere waarde mogelijk.

- Er is met één opnemer op het pand gemeten, er is dus sprake van een indicatieve meting. De partiële factor is $\gamma_v = 1,6$ op de gemeten trillingssterkte.
- De topwaarde van de gemeten trilling is als indicator gebruikt.
- De trillingen zijn opgevat als herhaald kortdurend. De partiële factor is $\gamma_t = 1,5$ op de karakteristieke waarde.
- De bouwkundige staat is als normaal opgevat, er is geen sprake van een gevoelig pand of een monumentale status. De partiële factor is $\gamma_s = 1,0$ op de karakteristieke waarde.

De rekenwaarde voor de sterkte komt dan uit op $V_r = 5/(1,5 \cdot 1,0) = 3,3$ mm/s. De gemeten maximale waarden moeten dan met 1,6 worden vermenigvuldigd om de rekenwaarde voor de trillingssterkte V_d te krijgen.

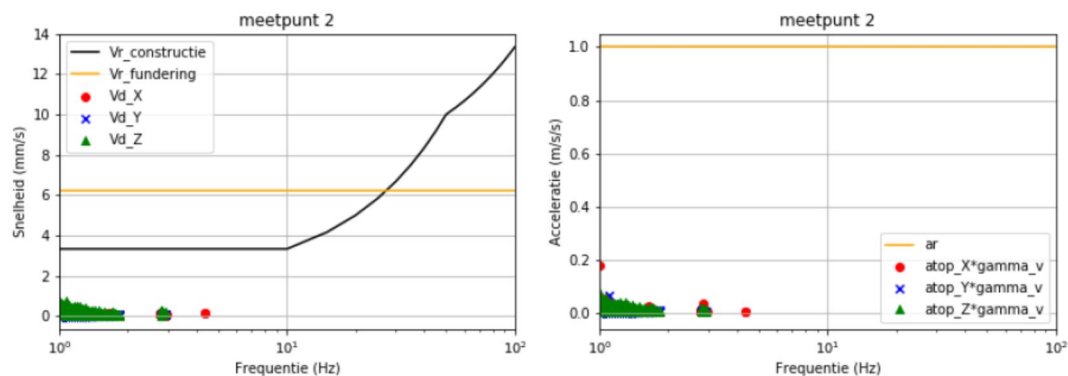
Voor de beoordeling van de schade aan de fundering is uitgegaan van een herhaald kortdurende trilling. De partiële factor is $\gamma_t = 1,6$ op de karakteristieke waarde.

Figuur 5.3 toont in de linker kolom alle waarden van V_d en V_r en in de rechter kolom de versnellingen, beide als functie van de frequentie. Dit zijn de figuren 6-1, 6-2 en 6-3 van het Movares rapport. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de factor γ_t voor de rekenwaardes kunnen verschillen. Praktisch gesproken is het verschil klein en heeft dit geen invloed op de beoordeling. In het rechter deel van de figuren in het Movares rapport zijn alle waarden van de versnelling getekend. De grenswaarde voor de versnelling is 1 m/s^2 .

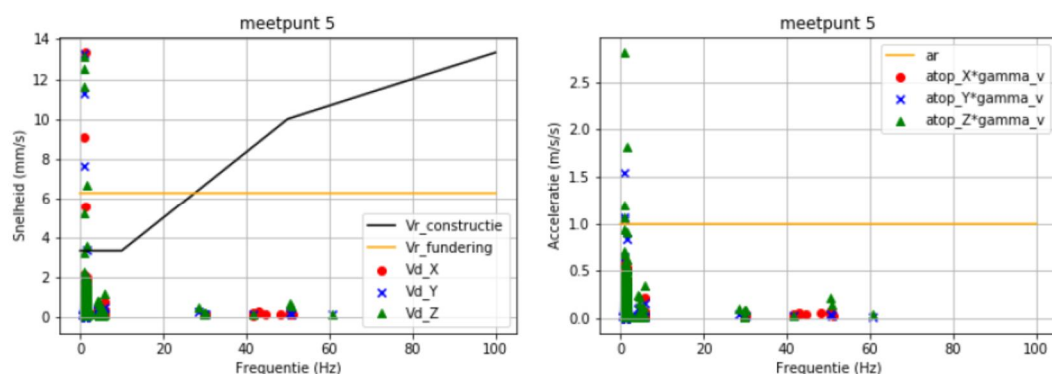
Tabel 5.1 geeft een overzicht van de resultaten voor de schade beoordeling. Voor elk meetpunt is de gemeten trillingssnelheid, de geldende grenswaarde voor de trillingssnelheid en de gemeten versnelling weergegeven (de grenswaarde voor de versnelling is 1 m/s^2). Voor de volledigheid zijn de trillingsniveaus die als uitbijter zijn aangemerkt tussen haakjes weergegeven.

Tabel 5.1 Overzicht maatgevende trillingsniveaus voor beoordeling schade

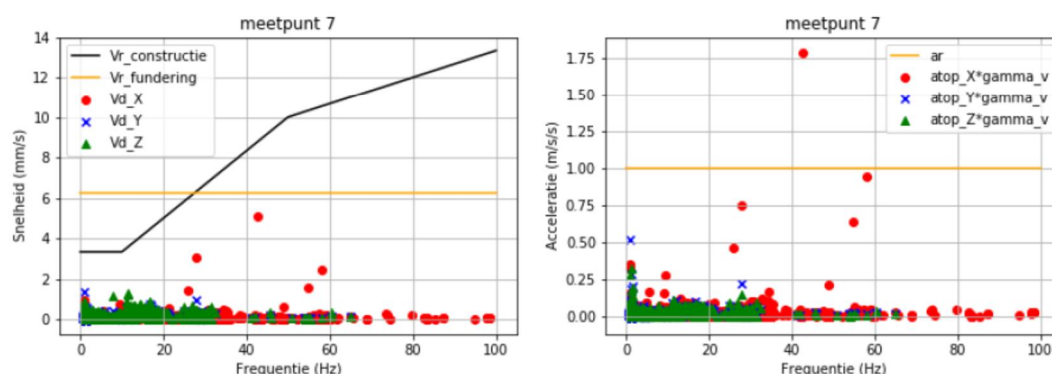
Meetpunt	Trillingssnelheid [mm/s]	Grenswaarde [mm/s]	Versnelling [m/s ²]	Opmerkingen
2	1	3.5	0.2	
5	1.2 (13)	3.5	0.4 (2.7)	(uitbijters met frequentie 1Hz)
7	3 (5.5)	6.5	0.95 (1.8)	(uitbijter bij 42 Hz)



Meetpunt 2 - toetsing schade (links: snelheid, rechts: acceleratie) (de horizontale as is logaritmisch)



Meetpunt 5 - toetsing schade (links: snelheid, rechts: acceleratie)



Meetpunt 7 - toetsing schade (links: snelheid, rechts: acceleratie)

Figuur 5.3 Resultaten trillingsmetingen Movares meetpunten bij de Puntbrug

Bij meetpunt 5 (opnemer bevestigd aan de muur) worden een aantal overschrijdingen waargenomen. Deze zijn door Movares beoordeeld, door op hetzelfde moment de trillingen gemeten met de opnemer op de vloer in het zelfde pand te beoordelen. Aangezien in die opnemer geen grote trilling zichtbaar is, mag worden geconcludeerd dat deze trillingen geen externe bron als oorzaak heeft. Hierbij moet gedacht worden aan het aanstoten van de opnemer of de muur waarop de opnemer is gemonteerd of een zwaar voorwerp dat direct naast de opnemer valt.

Voor meetpunt 7 is door Movares een vergelijkbare redenering gevolgd, maar het vergelijkingspunt is weer de opnemer in het andere appartementengebouw geweest, dus veel verder weg. Daarnaast is geconstateerd dat de frequentie karakteristiek van deze grote trilling

afwijkt van wat in de andere situaties wordt waargenomen: de overheersende frequentie is 40 Hz. In vergelijking met de resultaten aan de appartementsgebouwen A en B valt op dat in bij pand D vaker trillingen met hoge frequenties een rol spelen. Het is onduidelijk of dit samenhangt met een eigenschap van het gebouw of een lokale trillingsbron nabij het pand of, bijvoorbeeld in de industrie achter het pand. In dat geval is het te verwachten dat bij de Pand D wel trillingen optreden die een andere frequentie karakteristiek hebben en aan de overzijde van het kanaal niet meer worden waargenomen.

Deltares heeft voor de vier grootste trillingen in meetpunt 7 de gemeten signalen als functie van de tijd meer in detail bekeken en vergeleken met andere signalen in deze opnemer. Deze hebben typisch het gedrag van een eenmalige aanstoting en daarna snel uitdoven van de trilling. Dit beeld wijkt enigszins af van de overige trillingen die in dit pand zijn gemeten, die meestal langer van duur zijn, maar ook een veel kleinere amplitude hebben. Dit wijst op een lokale aanstoting, tegen het gebouw of zelfs de opnemer zelf. De trilling is slechts in één richting beschikbaar voor nadere analyse, wat een definitieve beslissing bemoeilijkt. Tijdens de rij- en sluitproeven (in paragraaf 5.6 beschreven) was deze opnemer niet aangesloten, zodat er ook geen beeld van de trillingen bij brugsluiting en verkeerspassages beschikbaar is.

Het is hierdoor, anders dan Movares concludeert, niet uit te sluiten dat deze trillingen niet door verkeer, scheepvaart of brugsluitingen zijn veroorzaakt.

5.5.5 Beoordeling van het aspect hinder

De metingen in volgende punten zijn beoordeeld op het aspect hinder:

- Pand A (Hardenberg net over de gemeentegrens) (meetpunt 9).
- Pand B (meetpunt 10).
- Appartementengebouw A, prioriteitspand, appartement, vloer hinder (meetpunt 4).
- Appartementengebouw Pand E 1^{ste} verdieping, vloer hinder (meetpunt 6).

De beoordeling is uitgevoerd volgens de SBR-richtlijn deel B [8]. Beoordeeld wordt de maximale effectieve trillingssterkte ($V_{eff,max}$). De effectieve waarde wordt aangepast aan de gevoeligheid van mensen voor verschillende type signalen, zodat er met één streefwaarde kan worden gewerkt. Voor de beoordeling wordt onderscheid gemaakt tussen drie zones:

- Als de maximale effectieve waarde onder de streefwaarde A_1 ligt, voldoet de situatie.
- Als de maximale effectieve waarde boven de streefwaarde A_2 ligt, voldoet de situatie niet.
- Als de maximale effectieve waarde tussen de streefwaares A_1 en A_2 ligt, voldoet de situatie als de trillingen niet te vaak voorkomen. Hoe vaak is niet te zeggen, dit hangt namelijk af van de grootte van de trillingen die de streefwaarde A_1 overschrijden. Dit wordt uitgedrukt in de zogenaamde periodieke waarde v_{per} , die moet voldoen aan de streefwaarde A_3 .

Er is onderscheid gemaakt tussen de verschillende dagperiodes (dag, avond en nacht). De beoordeling is uitgevoerd voor herhaald voorkomende trillingen met gebouwfunctie wonen. In deze (bestaande) situatie zijn de streefwaares $A_1 = 0,2$, $A_2 = 0,8$ en $A_3 = 0,1$ voor de dag en avond periode. Voor de nachtperiode is de streefwaarde A_2 gereduceerd: $A_2 = 0,4$.

Tabel 5.2 Overzicht maatgevende trillingssterkte voor beoordeling hinder (alle waarden dimensieloos). De onderste regel bevat de grenswaarden (A1 / A2 voor de maximale effectieve trillingssterkte v_{max} en A3 voor de periodieke waarde v_{per})

Meetpunt	Dag		Avond		Nacht	
	v_{max}	v_{per}	v_{max}	v_{per}	v_{max}	v_{per}
4	0.3	0.02	0.2	0.01	0.2	0.01
6	0.2	0.01	0.2	0.00	0.2	0.00
9	0.7	0.03	0.1	0.02	0.4	0.01
10	0.4	0.06	0.3	0.02	0.3	0.02
grenswaarden	0.2 / 0.8	0.1	0.2 / 0.8	0.1	0.1 / 0.4	0.1

Tabel 5.2 geeft de resultaten van de meting. De waarde voor v_{max} geeft de maximaal gemeten trilling weer. Deze moet worden getoetst aan de streefwaarde A1.

De trillingen zijn dan voor een deel van de bevolking niet meer voelbaar. Als de periodieke waarde aan de streefwaarde A3 voldoet, kan worden gesteld dat de trillingen voor veel mensen voelbaar zullen zijn, maar niet zo vaak voorkomen dat deze situatie als hinderlijk wordt ervaren.

Voor alle vier de meetpunten is geconcludeerd dat de gemeten trillingen voldoen aan de streefwaarden van de SBR-richtlijn. De A_2 waarde in meetpunt 9 wordt daar net niet overschreden, de periodieke waarde v_{per} geeft aan dat dit niet erg vaak gebeurt. Bij de overige panden is de marge groter.

5.5.6 Conclusie

Het doel van deze meting was het genereren van een algemeen overzicht van de trilling situatie rondom het kanaal.

Uit de metingen voor hinder blijkt dat in de vier beschouwde panden de trillingen voelbaar zijn, maar dat het niveau volgens de gangbare richtlijn acceptabel worden geacht. Vermoedelijk betreffen de trillingen verkeerstrillingen. Het pand met de hoogste belasting in de meetserie is Pand A. Pand A ligt heel dicht bij de weg naar de Kloosterbrug, waardoor het aannemelijk is dat hier relatief hoge trillingsniveaus optreden. De A_2 waarde wordt daar net niet overschreden, de periodieke waarde v_{per} geeft aan dat dit niet erg vaak gebeurt. Bij de overige panden is de marge groter.

Op basis van de resultaten van de resultaten van de metingen kan worden gesteld dat er in de omgeving van het kanaal niet een hoog trillingsniveau wordt gevonden. Hierbij moet worden aangetekend dat dit niet betekent dat er in geen enkel pand hinder zal worden ervaren. In specifieke situaties kan het trillingsniveau hoger zijn. Dit kan het gevolg zijn van verschillende oorzaken, zoals het type belasting (een slecht wegdek, een verkeersdrempel) of specifieke eigenschap van het pand (afmetingen van het pand, aanwezige grondlagen onder het pand).

Uit de metingen voor schade blijkt dat de trillingsniveaus zodanig zijn dat er volgens de gangbare richtlijn geen schade te verwachten is. Voor schade aan de constructie is de marge groot. Voor schade aan de fundering is er aan het pand D één gebeurtenis geweest die een te hoge versnelling heeft gegeven. Alle andere gebeurtenissen liggen onder de geldende grenswaarden. De trillingsvorm van deze hoge trilling wijst op een lokale trillingsbron. Bij de andere twee panden ligt de rekenwaarde voor de trillingssterkte een factor 3 of meer onder de rekenwaarde voor de grenswaarde.

5.6 Bemande trillingsmetingen bij de Puntbrug

5.6.1 Aanleiding voor deze metingen

Er is een aantal bruggen over het kanaal vervangen. Deze bruggen hebben een besturingssysteem dat er voor zorgt dat de brug veilig en beheerst kan worden geopend en gesloten. Er zijn na de oplevering problemen geweest met het besturingssysteem van de Puntbrug waardoor het sluiten niet goed verliep. Ideaal moet het brugdek vlak voor de horizontale stand tot stilstand komen en dan langzaam verder sluiten, maar dat gebeurde niet, waardoor de brug met een klap dichtging. De bewoners van de omliggende panden hebben de vrees uitgesproken dat de klappen zo hard waren dat hun panden daardoor zijn beschadigd.

5.6.2 Doel van de metingen

Het doel van de meting is het bepalen van de overdracht van trillingen tussen de brug en de panden. Omdat de brugsluitingen nog steeds plaats vinden is het idee dat de trillingen tijdens een normale, recente brugsluiting kunnen worden gebruikt om de overdracht van de trillingen naar het pand te bepalen. Om dezelfde reden zijn verschillende valgewicht metingen uitgevoerd. Ook de uitgevoerde rijproef met een zware kraanwagen en een trekker met een maximaal beladen kieper als aanhanger is hiervoor worden gebruikt.

Door rekentechnisch, op basis van deze metingen, te bepalen hoeveel de trillingen tijdens de instelling van het nieuwe besturingsmechanisme kunnen zijn geweest, kan worden geschat in hoeverre deze trillingen tot schade hebben kunnen leiden.

5.6.3 Werkwijze bij de metingen

De volgende trillingsopnemers zijn rondom de Puntbrug in Vroomshoop gebruikt:

- Puntbrug fundering, (in kelder i.v.m. bron sterkte) (meetpunt 1).
- Appartementengebouw A, prioriteitspand, muur schade (in de parkeergarage op de hoek, meetpunt 2).
- Appartementengebouw A, prioriteitspand, muur schade (in de parkeer garage op de tussenmuur, meetpunt 3).
- Appartementengebouw A, prioriteitspand, vloer hinder (meetpunt 4).
- Appartementengebouw B, prioriteitspand, begane grond, muur schade (meetpunt 5).
- Appartementengebouw Pand E 1^{ste} verdieping, vloer hinder (meetpunt 6).
- Pand D, muur schade (meetpunt 7).

Dit zijn dezelfde opnemers en locaties die voor de onbemande meting (zie paragraaf 5.5) zijn gebruikt.

In dit geval zijn de trillingsmetingen via een toongenerator gesynchroniseerd, zodat de resultaten beschikbaar zijn voor een uitwerking waarbij de synchronisatie van belang is. De opnemers 2 tot en met 6 komen overeen met de opnemers die zijn besproken in paragraaf 5.5. De opnemer aan de Pand D heeft door een vergissing niet gemeten tijdens deze meting. Daarnaast is een geluidsopname in de kelder gemaakt, zodat bepaald kan worden wat er bij de brug aan activiteit optreedt.

De trillingsmeting is uitgevoerd door Movares B.V. uit Utrecht op 23 mei 2019.

Er zijn trillingsmetingen uitgevoerd tijdens passages van het reguliere verkeer, de uitgevoerde testritten met een zware kraanwagen en een trekker met een maximaal beladen kieper als aanhanger, enkele standaard brugsluitingen (waaronder enkele extra openingen voor deze meting) en belastingen op de bodem met een valgewicht.

Bij de valgewicht proeven valt een gewicht van ongeveer 90 kg van een hoogte van 2 m naar beneden. Om de ondergrond te beschermen is een dun zandlaagje aangebracht.



Figuur 5.4 Locaties opnemers voor opnemers voor schade

5.6.4 Resultaten van de meting

De resultaten zijn 12 juli 2019 bij Deltares binnengekomen. Deze paragraaf beschrijft de analyses.

Tijdens de meting heeft de apparatuur in meetpunt 2 (in de parkeergarage) niet gewerkt. De apparatuur in meetpunt 4 (vloer appartement in de appartementengebouw A) heeft pas 52 minuten na aanvang van de meting een signaal gegeven.

Bijlage H geeft een gedetailleerde beschrijving van de metingen en de analyse. Bijlage H.1 gaat in op de synchronisatie van de signalen. Bijlage H.2 beschrijft de meetresultaten van de normale brugsluitingen, bijlage H.3 de meetresultaten van de valgewichtproeven.

Bijlage H.4 geeft een verdere analyse van de trillingen van de recente, normale brugsluitingen. Hieruit blijkt dat het gemeten trillingsniveau op de fundering van de kelder van de Puntbrug tijdens het sluiten ongeveer 0,05 - 0,08 mm/s is. Het betreft hier de verticale trilling. In de panden in de omgeving worden op dat moment vergelijkbare trillingen gemeten, die niet boven de 0,05 mm/s uitkomen. Op basis van de SBR richtlijnen liggen deze trillingen onder de toelaatbare waarden.

De resultaten van de rijproeven zijn hierna samengevat.

De trillingen als gevolg van de rijproeven zijn in de meetbestanden geïdentificeerd. Voor elke opnemer aan de gevel is de maximale waarde van de trilling bepaald. Bijlage K toont de maximaal gemeten snelheden in de meetpunten per richting voor alle passages. De bijlage geeft ook de maximale waarde, de gemiddelde waarde en de standaard afwijking.

Tabel 5.3 geeft een samenvatting van de resultaten. Voor een beoordeling volgens de SBR-richtlijn moeten de gemeten trillingen met de partiële factor worden vermenigvuldigd voor de indicatieve meting (1,6). Beide panden zijn in goede staat, dus de karakteristieke waarde hoeft alleen door de partiële factor voor het type trilling worden gedeeld. Verder heeft appartementengebouw A een betonnen skelet ($v_{kar,min} = 20$ mm/s), en is appartementengebouw B gemetseld ($v_{kar,min} = 5$ mm/s). Deze waarde geldt ook voor de niet-dragende delen van het gebouw. De partiële factor voor de herhaald kortdurende trillingen is 1,5, zodat de grenswaarde V_d gelijk is aan $V_{kar,min} / 1,5$. In de laatste kolom van Tabel 5.3 is de verhouding tussen de rekenwaarde voor de sterkte en de rekenwaarde voor de belasting gegeven.

Tabel 5.3 Maximale gemeten snelheid (V_{top}) aan de gevel tijdens de rijproeven en beoordeling, alle trillingsnelheden in [mm/s]. De factor in de rechter kolom is dimensieloos

Pand	Vrachtwagen		Tractor met kieper		Beoordeling		Factor
	V_{top}	V_d	V_{top}	V_d	V_{kar}	V_r	
appartementengebouw A, garage draagconstructie	0,22	0,33	0,79	1,19	20	12,5	10,5
appartementengebouw A, garage afwerking	0,22	0,33	0,79	1,19	5	3,1	2,6
Pand E	0,14	0,21	0,42	0,63	5	3,1	4,9

De meeste voertuigpassages blijken goed herkenbaar, maar er zijn ook andere trillingen geregistreerd die een vergelijkbare grootte hebben. De meest aannemelijke verklaring hiervoor zijn andere zware voertuigen die vergelijkbare trillingen geven.

Uit Tabel 5.3 blijkt dat alle zware verkeer ruim onder de toelaatbare waardes blijft. Hierbij moet worden opgemerkt dat de passage met de tractor, die het hoogste niveau in beide panden geeft, een extreem geval lijkt. Opvallend hierbij is dat in de fundering van de brug geen verhoogd niveau is gemeten, maar wel aan de vloer van het appartement in de Pand E. Dit suggereert dat deze trilling niet tijdens het rijden over de brug is ontstaan.

De hinder is voor deze rijproef niet in detail beschouwd. De topwaardes van de gemeten trillingen V_{top} (dus niet $v_{eff,max}$) suggereren dat deze trillingen af en toe voelbaar zullen zijn.

5.6.5 Rekenmodel voor ongecontroleerde brugsluitingen

De vraag is nu hoe de uitgevoerde metingen kunnen worden vertaald naar een situatie tijdens een mogelijk ongecontroleerde brugsluiting. Daarvoor wordt een model uitgewerkt. Bijlage H.5 beschrijft het model.

De grootte van de klap wordt evenredig gesteld met de grootte van de valsnelheid waarmee de brug de fundering raakt. Het brugdek wordt opgevat als een homogene starre staaf die roteert om een scharnier aan de zijde van de kelder, zie Figuur bijlage H.13.

Om een indruk te krijgen van de hoeksnelheid van het brugdek, wordt gekeken naar de standaard opening. Globaal duurt een brugopening of sluiting 35 sec en roteert de brug over ongeveer 80° . Dit geeft een hoeksnelheid in de orde van 2° per seconde of te wel 0,035 rad/s. Uit beelden op YouTube blijkt dat de brug momenteel vlak voor het sluiten stopt en aanzienlijk langzamer sluit, de bijbehorende vergelijkbare valhoogte is onder de 0,01 m.

Als het besturingsmechanisme faalt, kan het brugdek in vrije val neerkomen. Hierbij moet worden aangetekend dat dit type brug een evenwichtsconstructie is, de bewegende massa is weliswaar groot, maar de aandrijvende kracht is klein.

Voor de efficiëntiefactor wordt gekozen $\alpha = 0,8$ en voor de valhoogte bij de huidige sluiting $u_{o,nu} = 1$ mm. Een grotere valhoogte in de huidige situatie geeft een lager trillingsniveau tijdens een ongecontroleerde brugsluiting. Bij een valhoogte van 1 m is de rotatiesnelheid tijdens de klap 28 maal zo groot, bij een valhoogte van 3 m is de rotatiesnelheid tijdens de klap 50 maal zo groot als bij de huidige sluitingsprocedure. De grootste snelheid in de panden tijdens de extra sluitingen was 0,05 mm/s. Opschalen geeft een maximale snelheid van 2,5 mm/s bij de valhoogte 3 m. Dit is voor een betonnen gebouw in goede staat een toelaatbare snelheid.

Voor een gebouw uit metselwerk geldt de volgende analyse. Naar verwachting zijn nieuwbouw appartementencomplexen A en B in goede staat. Voor de sterkte van een categorie 2 pand is de karakteristieke waarde van de grenswaarde 5,0 mm/s. Voor een pand in goede staat is de partiële factor voor de staat $\gamma_s = 1,0$ en de partiële factor voor het type trilling $\gamma_t = 1,0$ voor een trilling die niet zo vaak voorkomt. De rekenwaarde van de grenswaarde is dus $v_d = 5,0$ mm/s. Voor een beperkte meting is de partiële factor 1,6, zodat de rekenwaarde voor de belasting $v_r = 1,6 \cdot 2,5 = 4,0$ mm/s is; dit ligt onder de grenswaarde.

5.6.6 Conclusie

De resultaten van de metingen tonen aan dat het niet aannemelijk is dat schade is ontstaan aan de appartementsgebouwen A en B (beide prioriteitspanen) als gevolg van de brugsluitingen. De verwachting is dat de trillingen soms wel voelbaar zijn, maar niet boven de streefwaardes voor trillingshinder zullen uitkomen.

Ook de pandopnamen geven aan dat er geen schade als gevolg van trillingen is waargenomen.

5.7 Bemande metingen prioriteitspand

5.7.1 Doel van de meting

Doel van deze meting is de invloed van trillingen in de ondergrond in kaart te brengen. Deze metingen hebben tot doel na te gaan of ten gevolge van de thans actieve trillingsbronnen, het optreden van tijdelijke wateroverspanningen en verlies van draagkracht in de ondergrond mogelijk is. De waterspanningsmeters zullen vanaf juni 2019 nog circa zes maanden blijven staan om de fluctuaties in waterspanningen over een langere tijd te meten.

Deze meetcampagne moest de volgende concrete vragen beantwoorden:

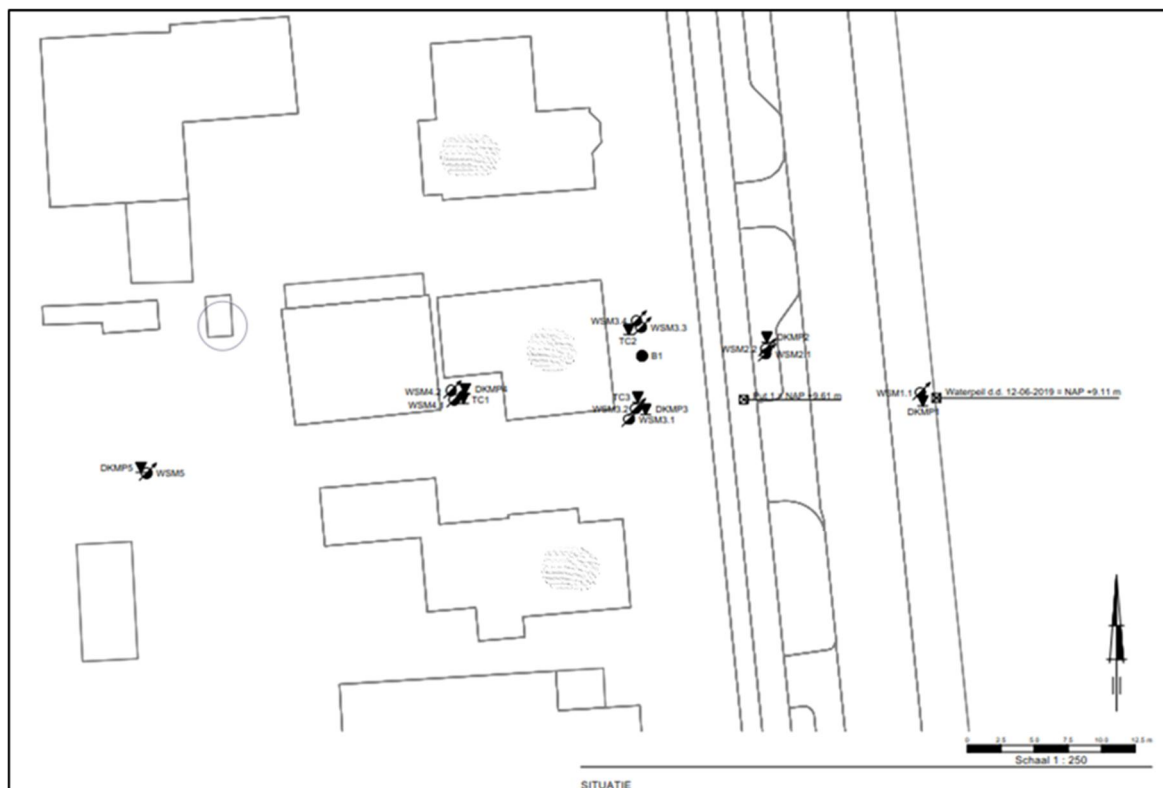
- Wat is op dit moment de grondwaterstand en het verloop met de afstand tot het kanaal nabij het pand in de zandlaag waar het pand op is gefundeerd.
- Hoe groot zijn de voelbare trillingen als gevolg van de scheepvaart en zwaar verkeer over de weg; en is er een (significant) verschil tussen de schepen die voor en na de opwaardering van het kanaal gebruik maken. Hierbij speelt dat de grotere schepen een mogelijk zwaardere belasting veroorzaken, of dat zij een andere frequentie hebben die zich beter door de bodem en/of het pand voortplanten of juist tot versterking in de vloeren leiden.
- In hoeverre kunnen deze trillingen tot directe schade aan het pand leiden?
- In hoeverre kunnen deze trillingen een cyclische belasting geven in de zandlaag waar het pand op is gefundeerd en leidt dit tot verdichting of wellicht cyclische vermindering van draagkracht van de zandlaag onder de fundering?

5.7.2 Werkwijze en keuze meetpunten

Er is een meetcampagne uitgevoerd en er zijn pandopnames gedaan. Het Prioriteitspand is gekozen in overleg met de opdrachtgever en klankbordgroep omdat dit pand één van de panden was dat de grootste schade heeft opgelopen. Het doel is na de interpretatie van de metingen bij dit pand om ook te zien of de gemeten respons in de ondergrond en op het pand te relateren valt aan andere trajecten en met andere panden langs het kanaal.

Om bovenstaande vragen goed te kunnen beantwoorden is een intensieve meetcampagne uitgevoerd om data in te winnen. Tevens is grondonderzoek uitgevoerd. Er zijn 5 sonderingen en 1 boring (met continue monsternamen) uitgevoerd, 10 waterspanningsmeters geplaatst (plus 1 drukopnemer in het kanaal) en drie speciale conussen in de ondergrond gebracht met in elke conus drie versnellingsopnemers in drie onderling loodrechte richtingen. In het pand zelf zijn in de kelder op 2 locaties versnellingsopnemers geplaatst (op elke locatie in twee richtingen) en drie standaard trillingsopnemers van een ander type geplaatst (1 op de bovenverdieping en twee op

de begane grond). Deze meten continu, maar slaan alleen de variabelen op die volgens de SBR-richtlijnen moet worden beoordeeld. Aan de voorgevel zijn tot slot op 1 locatie aan de buitengevel versnellingsopnemers in 2 richtingen en op een 2^{de} locatie versnellingsopnemers in 3 richtingen geplaatst. In de onderstaande figuur zijn de locaties weergegeven conform de ingemeten posities. Figuur 5.5 geeft een schematisch overzicht van de instrumentatie. Een duidelijkere uitvergroting van deze figuur is te zien op de 5^{de} pagina van [4] de rapportage van het Geotechnisch onderzoek uitgevoerd door Fugro.



Figuur 5.5 Locatie van de instrumenten

Het geotechnisch grondonderzoek en het plaatsen van de meetinstrumenten is uitgevoerd tussen 6 en 11 juni. De Meetinstrumenten zijn aangesloten op 17 juni waarna de bemande metingen hebben plaatsgevonden tot en met 20 juni. Vrijdag de 21^{ste} juni zijn alle waterspanningsmeters op zogeheten loggerkasten aangesloten welke zes maanden zullen blijven doormeten.

Tabel 5.4 geeft de naam en de locatie van de opnemers. De signalen 1 tot en met 18 betreffen versnellingsopnemers. Deze meten de trillingen die in de bodem optreden. Elk signaal is een meting in één richting. Door drie instrumenten vlak bij elkaar te plaatsen wordt de versnelling in alle drie de richtingen gemeten. Signaal 19 is een diver, die meet de waterstandsvariatie in het kanaal. De signalen 20-29 meten de waterspanningen in de grond. In dit onderzoek lag in deze fase de nadruk op de snelle variaties in de waterspanningen.

Voorafgaand aan de installatie worden alle opnemers statisch doorgemeten in de richting van de zwaartekracht en wordt de opnemer nog omgedraaid, zodat ook in de tegenovergestelde richting wordt gemeten. De kalibratiefactor wordt bepaald onder de aanname dat de versnelling van de zwaartekracht 9,81 m/s² is. Bijlage F geeft een kort overzicht van de verschillende meetinstrumenten en de bewerkingen die zijn uitgevoerd om tot een beoordeling te komen.

Kanaal	Opnemer	Type	Locatie
1	TC1-V	acc	ter hoogte van achtergevel bij wsm 4-1 en 4-2 verticaal
2	TC1-HL	acc	idem horizontaal haaks richting kanaal
3	TC1-HE	acc	idem horizontaal evenwijdig aan kanaal
4	TC3-V	acc	ter hoogte van voorgevel bij wsm 3-3 en 3-4 verticaal
5	TC3-HL	acc	idem horizontaal haaks richting kanaal
6	TC3-HE	acc	idem horizontaal evenwijdig aan kanaal
7	TC4-V	acc	ter hoogte van voorgevel bij wsm 3-1 en 3-2 verticaal
8	TC4-HL	acc	idem horizontaal haaks richting kanaal
9	TC4-HE	acc	idem horizontaal evenwijdig aan kanaal
10	TC5-V	acc	aan de oostgevel noordhoek
11	TC5-HL	acc	idem horizontaal haaks richting kanaal
12	TC5-HE	acc	idem horizontaal evenwijdig aan kanaal
13	V5	acc	aan de oostgevel zuidhoek verticaal
14	V6	acc	idem horizontaal haaks richting kanaal
15	V7	acc	kelder oostmuur hoek verticaal
16	V9	acc	idem horizontaal haaks richting kanaal
17	V10	acc	kelder oostmuur hoek verticaal
18	V11	acc	idem horizontaal haaks richting kanaal
19	0	wsm	kanaal
20	1	wsm	kanaalberm
21	2-1	wsm	berm fietspad ondiep
22	2-2	wsm	berm fietspad diep
23	3-1	wsm	voortuin zuidzijde ondiep
24	3-2	wsm	voortuin zuidzijde diep
25	3-3	wsm	voortuin noordzijde ondiep
26	3-4	wsm	voortuin noordzijde diep
27	4-1	wsm	ter hoogte van achtergevel ondiep
28	4-2	wsm	ter hoogte van achtergevel diep
29	5	wsm	achtertuintuin

Tabel 5.4 Signaalnummer en locaties van de instrumenten. In de kolom type staat het type opnemer: acc = versnellingsopnemer, wsm = waterspanningsmeter. TC is de naam van de speciale conussen met drie versnellingsopnemers die onderling loodrechte richtingen meten

5.7.3 Selectie van de gebeurtenissen

Op basis van de dagboek aantekeningen zijn de volgende scheepspassages geselecteerd, zie Tabel 5.5. Het tijdstip is het moment dat de boeg een virtuele lijn voor het pand passeert, de kolom tot hek geeft het aantal seconden dat het duurt voordat de achterzijde (het 'hek') passeert. Uit de lengte van het schip en deze tijdsduur kan een indicatie van de vaarsnelheid worden gekregen. Deze varieert van 1 m/s tot 4 m/s. De overige gegevens zijn via zoeken op internet achterhaald.

Tabel 5.5 Geselecteerde boten prioriteitspand op basis van de dagboek aantekeningen. De laatste twee kolommen zijn via internet bepaald

No	Dag juni 2019	Tijd boeg	Tot hek [s]	Schip	Lading	Dim. [m*m]	Richting snelheid [knopen]
S01	18	09:55:36		schip 1	Vol	63*7	3,5
S02	18	11:42:30	46	schip 2	geladen	55*6	2,8
S03	18	13:56:10	12	schip 3		39*5	Z
S04	18	15:45:32	12	schip 4		39*6	Z
S05	18	16:15:38	17	schip 5	leeg	53*12	Z
S06	19	09:09:39	26	schip 6		39*5	2,7-3,1
S07	19	16:26:22	21	schip 1	leeg	63*7	
S08	19	14:58:43	38	schip 7			2,8
S09	20	10:32:41	23	schip 2	leeg	55*6	Z 5.7

Tijdens de passage van een schip is in de diver (in het kanaal, signaal 19) een duidelijke verlaging van de druk zichtbaar. Dit is een bekend effect uit de scheepvaart.

Om de verschillen met kleinere boten te kunnen zien is ook de passage van een groot plezierjacht op 18 juni om 11:43:55. Dit is een jacht van ongeveer 10 m lengte.

Op 18 juni zijn verschillende test ritten met een trekker met oplegger (gewicht boven de 60 ton) en een vrachtauto gemaakt. Deze zijn met verschillende vooraf afgesproken snelheden gepasseerd. De chauffeurs van de voertuigen hebben getracht deze snelheid op hun kilometerteller aan te houden. De passages zijn vermeld in Tabel 5.6 en in Tabel 5.7. Opgemerkt wordt dat 60 km/u een niet toegestane snelheid is en naar verwachting gezien de verkeerssituatie niet gereden zal worden. Van het overige (reguliere) verkeer is de snelheid niet gemeten. Wel is af en toe een aantekening in het logboek gemaakt als de snelheid door de veldmedewerker als extreem werd beoordeeld.

Tabel 5.6 Testritten met de vrachtwagen met oplegger prioriteitspand

Passage	Tijd	Richting	Snelheid [km/u]	Opmerking
V01	13:09:07	N → Z	30	
V02	13:13:18	Z → N	30	
V03	13:17:26	N → Z	50	
V04	13:22:45	Z → N	50	
V05	13:26:30	N → Z	5	stopt bijna
V06	13:31:25	Z → N	65	
V07	13:35:37	N → Z	50	

Tabel 5.7 Testritten met de trekker met oplegger prioriteitspand

Passage	Tijd	Richting	Snelheid [km/u]	Opmerking
T01	13:08:30	Z → N	45	
T02	13:10:40	N → Z	40	
T03	13:12:36	Z → N	30	
T04	13:13:38	N → Z	30	
T05	13:15:33	Z → N	45	
T06	13:17:19	N → Z	35	
T07	13:22:15	Z → N	35	
T08	13:24:02	N → Z	45	
T09	13:26:21	Z → N	30	

De volgende passages op 18 juni zijn ook bekeken om een vergelijking tussen de testritten en het 'gewone' verkeer te maken: 11:42:30 rijdt een trekker hard voorbij (T10), 11:45:16 een vrachtauto (V08), 11:47:50 een trekker met oplegger (T11), 13:33:54 trekker met aanhanger (T12), 13:51:00 zandwagen (V09). Zie Tabel 5.8. De rijrichting is niet opgenomen. Dit zijn passages van het reguliere verkeer tijdens de rijproeven en daardoor is de rijsnelheid niet bekend.

Tabel 5.8 Passages overige voertuigen op 18 juni 2019

Passage	Tijd	Richting	Snelheid	Opmerking
V08	11:45:16	onbekend	onbekend	vrachtauto
V09	13:51:00	onbekend	onbekend	zandwagen
T10	11:42:30	onbekend	hard	trekker
T11	11:47:50	onbekend	onbekend	trekker met oplegger
T12	13:33:54	onbekend	onbekend	trekker met aanhanger

De resultaten van deze gebeurtenissen staan vermeld in Bijlage E.

5.7.4 Resultaten bij passerende schepen

5.7.4.1 Resultaten van de waterspanningsmeters

In de diver in het kanaal zijn de scheepspassages van de grote schepen duidelijk zichtbaar. Er treedt een verlaging van de waterspanning op. Figuur 5.6 geeft het gemeten signaal in de diver (bovenste figuur en de waterspanning direct achter de damwand voor de passage van schip 2 op 18 juni (S02 schip2 18).

Bij passage S01 geeft de diver een grotere verlaging van de waterspanning. Dit kan ontstaan door een grotere vaarsnelheid en/of een grotere doorsnede van het schip, waardoor er minder ruimte voor de waterstroming langs het schip aanwezig is. Het nadeel van passage S01 is het feit dat vlak voor deze passage nog trillingen ten gevolge van vrachtverkeer aanwezig zijn. Dit kan het beeld verstoren. Daarom is in deze paragraaf passage S02 bekeken, en verder op in paragraaf 5.7.5.1 weer passage S01. In bijlage E kunnen alle meetresultaten worden bekeken.

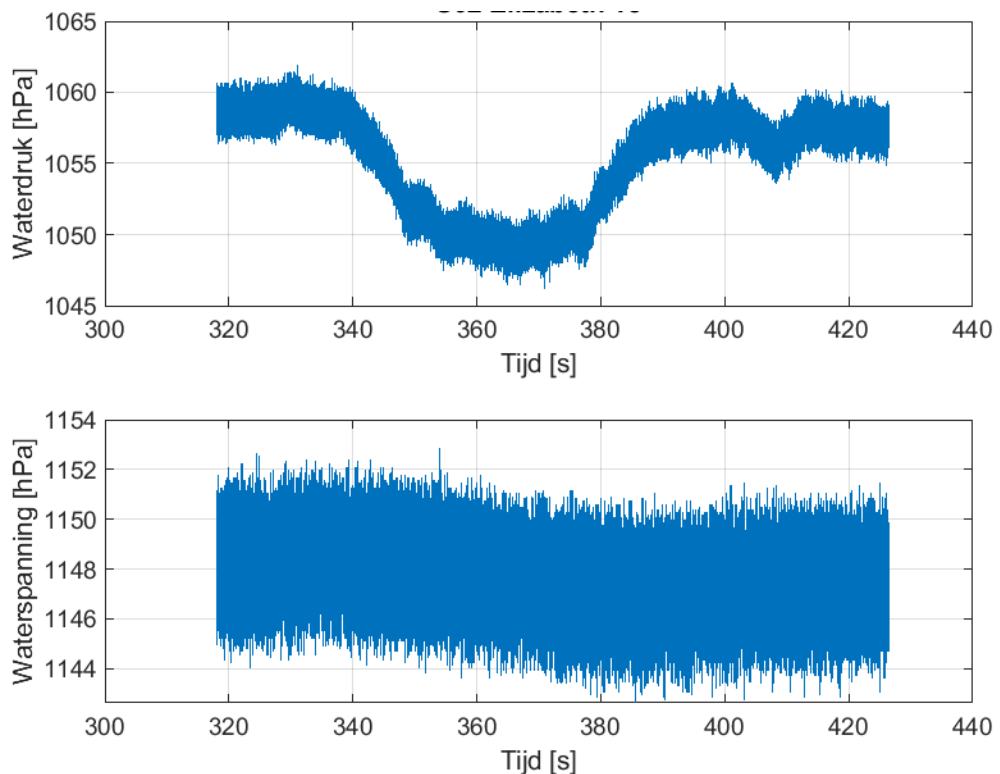
De verlaging tijdens de passages is duidelijk zichtbaar in de diver. De verlaging is ongeveer 12 hPa. Dit komt overeen met een waterstandsverlaging van 12 cm.

De waterspanning in de opnemer direct achter de damwand loopt ook langzaam terug. Dit lijkt logisch, omdat er water uit de grond het kanaal instroomt door de lagere waterstand in het kanaal.

Dit proces is veel trager. Als het schip voorbij is zal de waterstand weer naar de oorspronkelijke situatie terug gaan. In de opnemers voor het huis treedt dit effect niet op. Dit verschijnsel heeft daarom geen invloed op de waterstand ter plaatse van het huis.

Ook is zichtbaar dat er in het signaal uit de waterspanningsopnemer achter de damwand en ook verder weg alleen ruis zichtbaar is maar geen andere vibraties in de waterspanningen gedurende de passage zichtbaar zijn. Er worden in deze situatie door de passerende boten geen meetbare waterspanningen gegenereerd.

Mogelijk speelt de ruis in de signalen een rol. Het ruisniveau is orde 5 hPa. Dit komt overeen met een waterstandsvariatie van 5 cm. De signalen in de grond zijn in bijlage E getekend in zowel het tijdsdomein als het frequentie domein. In de bijlage met laatste letter T staat het signaal in de tijd. Bij de scheepspassages zijn de signalen rondom het pand zeer ruisvormig. Op de bijlage met de laatste letter F staat de frequentiekaracteristiek van dezelfde signalen.



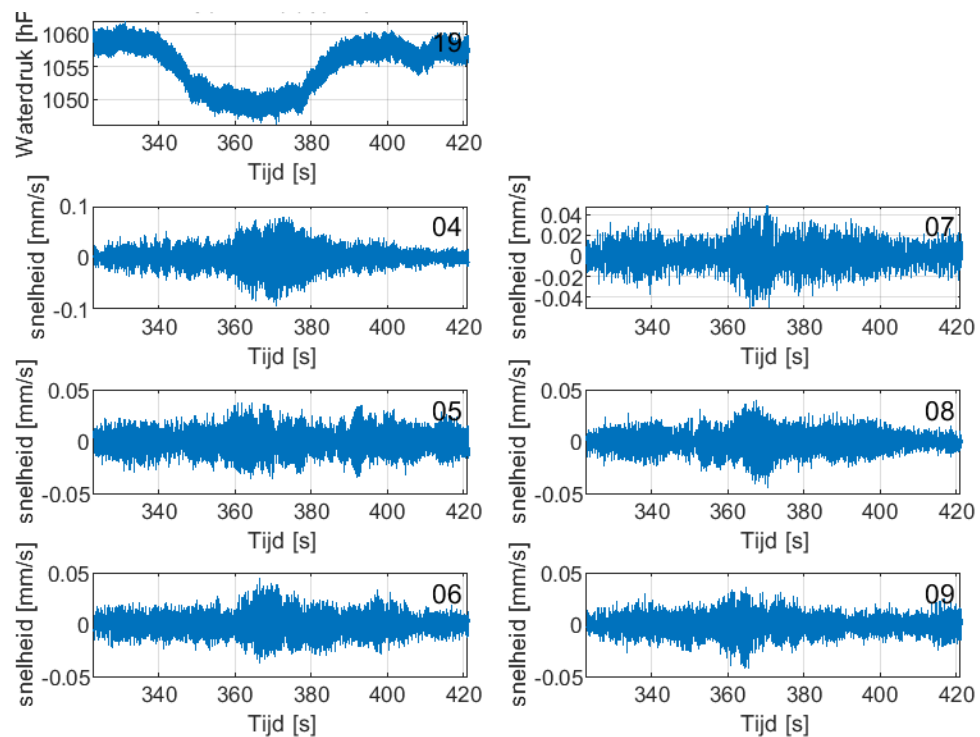
Figuur 5.6 Spanning in de diver (signaal 19) en direct achter de wand (signaal 20) bij passage S02 schip 2 op 18 juni

5.7.4.2

Resultaten van de versnellingsopnemers in de grond

De opnemers in de grond betreft de signalen 4 - 6 (zuidzijde) en 7-9 (noordzijde). Voor de passage van schip 2 op 18 juni (passage S02) worden de signalen hier besproken, zie Figuur 5.7. De trillingen in deze opnemers tijdens alle beschouwde scheepspassages staan in de drie bovenste figuren van de linker kolom in de overzichtsfiguren in Bijlage E. Hieruit blijkt ook dat schip 2 het schip is dat de zwaarste trillingen genereert. Bijlage G geeft de maximale waarde voor elke gebeurtenis voor alle signalen.

In het algemeen is er geen of beperkte toename van de trillingen zichtbaar tijdens de passage van de boten.

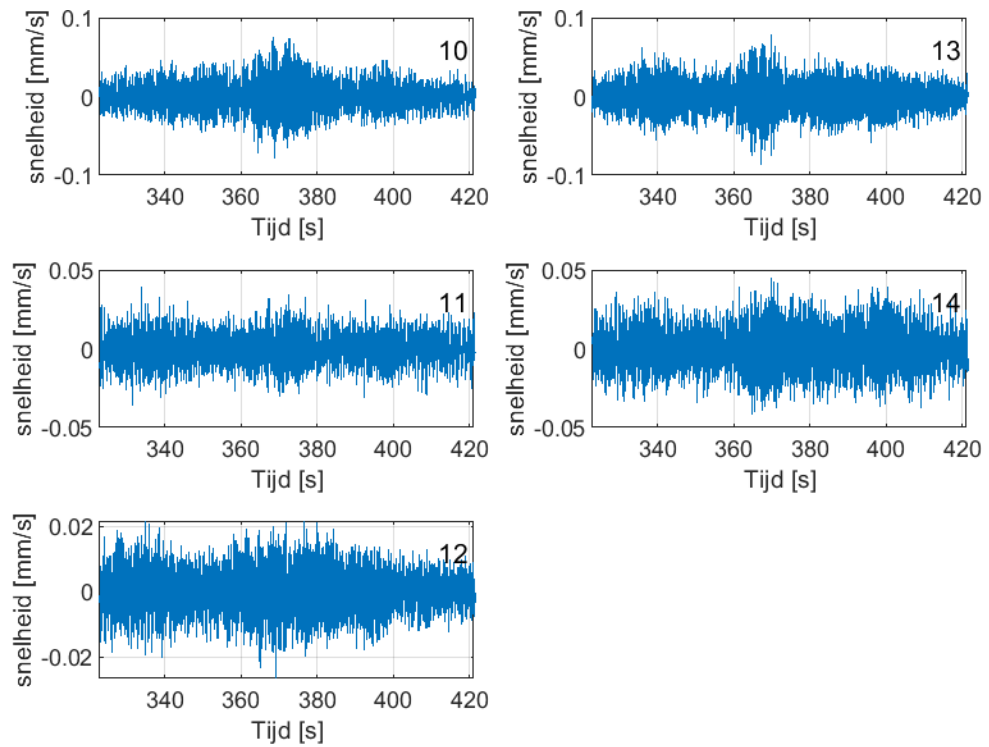


Figuur 5.7 Trillingsnelheden in de grond bij passage S02 schip 2 op 18 juni. Boven het signaal in de diver; daaronder de verticale, horizontale loodrecht en horizontale evenwijdig signalen. De linker kolom is voor de zuidzijde, de rechterkolom voor de noordzijde

5.7.4.3 Resultaten van de trillingsopnemers aan het pand

De opnemers aan het pand geven de signalen 10 - 12 (noordhoek) en 13 en 14 (zuidhoek). Figuur 5.8 geeft de trillingen tijdens passage S02 schip 2. Ook in het pand komen de trillingen nauwelijks boven het ruisniveau uit.

De trillingen gemeten in deze opnemers bij alle scheepspassages staan in de drie bovenste figuren van de middelste kolom in de overzichtsfiguren in Bijlage E.

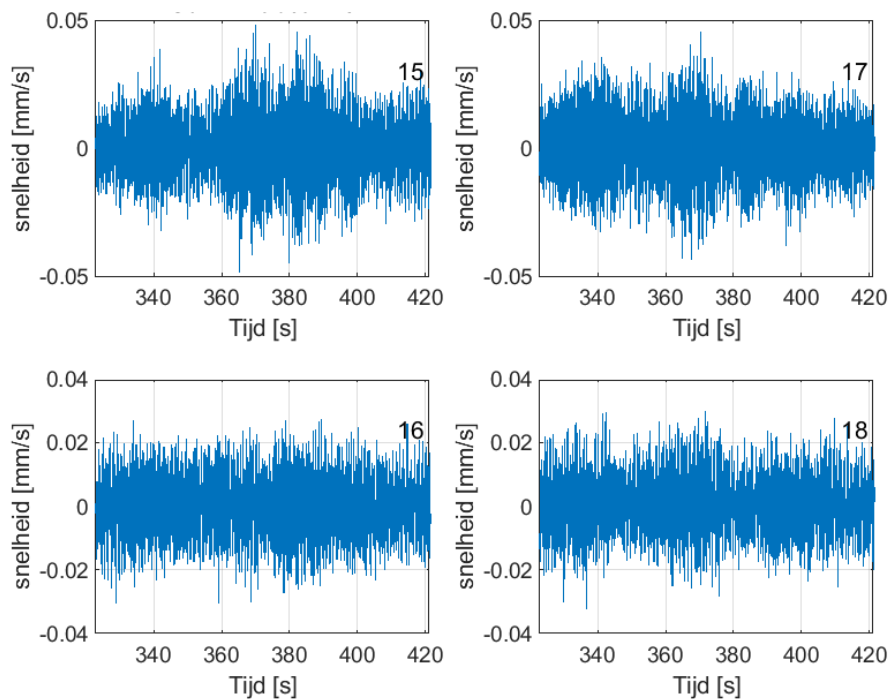


Figuur 5.8 Snelheden opnemers aan het pand bij passage S02 schip 2 op 18 juni. Onder elkaar de verticale, horizontale loodrecht en horizontale evenwijdig signalen. De linker kolom is voor de noordhoek, de rechterkolom voor de zuidhoek van het pand

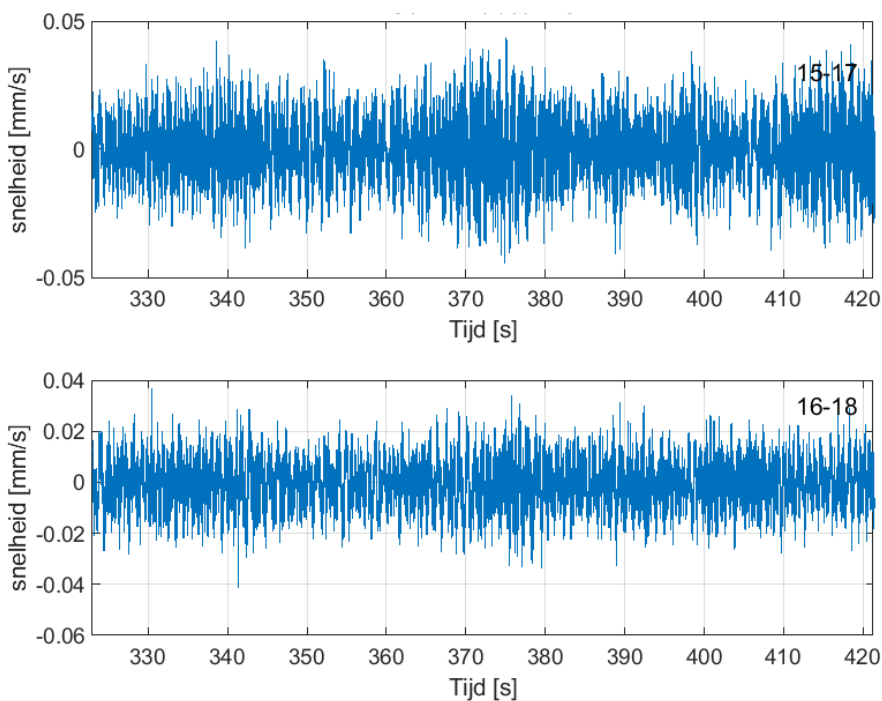
5.7.4.4 Resultaten van de trillingsopnemers in de kelder van het pand

In de kelder moeten de signalen 15 tot en met 18 worden beschouwd. De signalen 15 en 17 zijn verticale trillingen, de signalen 16 en 18 zijn horizontale trillingen in de richting loodrecht op de kanaal as. Naar verwachting zijn deze maximaal als de bron zich recht voor het pand bevindt.

Figuur 5.9 geeft de gemeten trillingen aan de keldermuur voor tijdens passage S02 schip 2. Ook aan de kelderwanden komen de trillingen nauwelijks boven het ruisniveau uit. Figuur 5.10 geeft aan dat het verschil in de trillingen niet veel afwijkt van de enkele trilling, zodat er geen sprake is van een ernstige interferentie van de trillingen.



Figuur 5.9 Trillingen aan de oostwand in de kelder bij passage S02 schip 2 op 18 juni. Onder elkaar de verticale en horizontale loodrecht. De linker kolom is de zuidzijde, de rechterkolom is de noordzijde

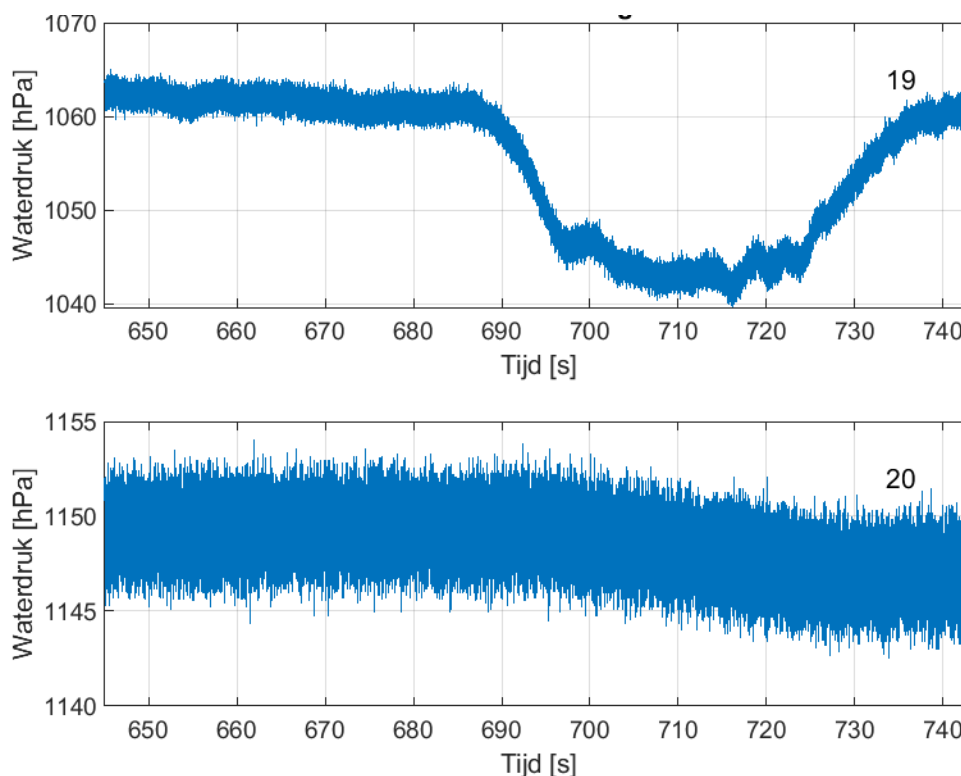


Figuur 5.10 Verschil in trillingen aan de oostwand in de kelder bij passage S02 schip 2 op 18 juni. Onder elkaar de verticale en horizontale loodrecht

5.7.5 Resultaten bij passerende vrachtwagens en trekkers

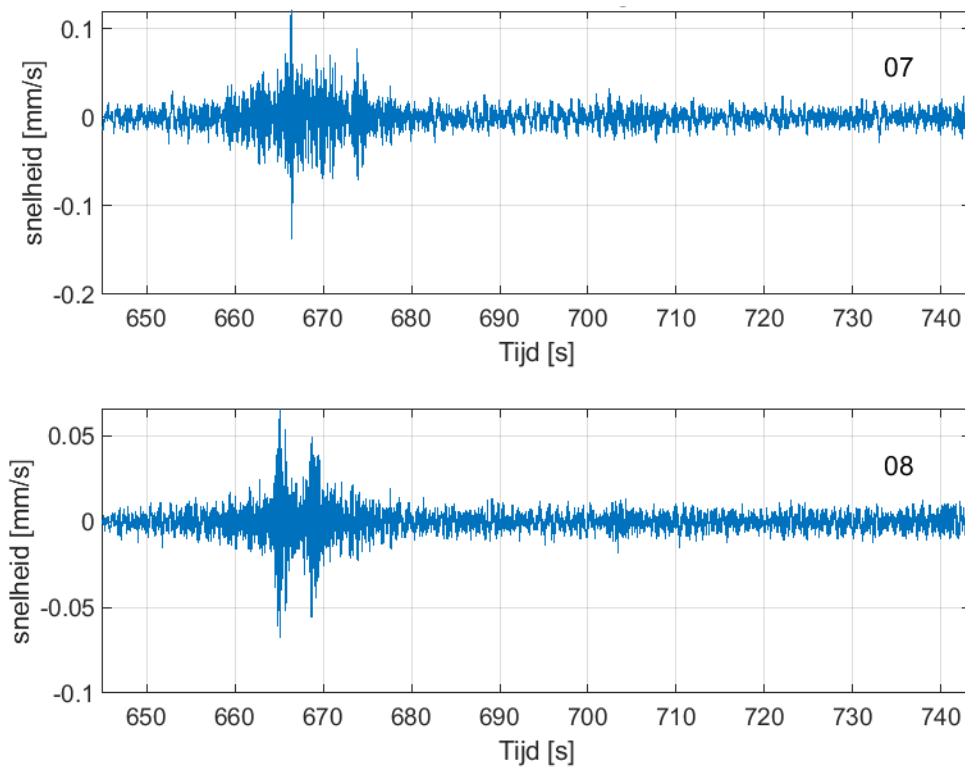
5.7.5.1 Waterspanningen tijdens de vrachtwagenpassages

Ongeveer 1 min voor de passage van schip 1 zijn twee vrachtwagens gepasseerd. In deze paragraaf wordt de meting gebruikt om na te gaan hoe de trillingen en waterdrukken verschillen tijdens de passage van vrachtwagens en boten.



Figuur 5.11 Waterdruk in diver (boven) en waterspanningsmeter achter de damwand (onder) tijdens passage S01 schip 1 op 18 juni

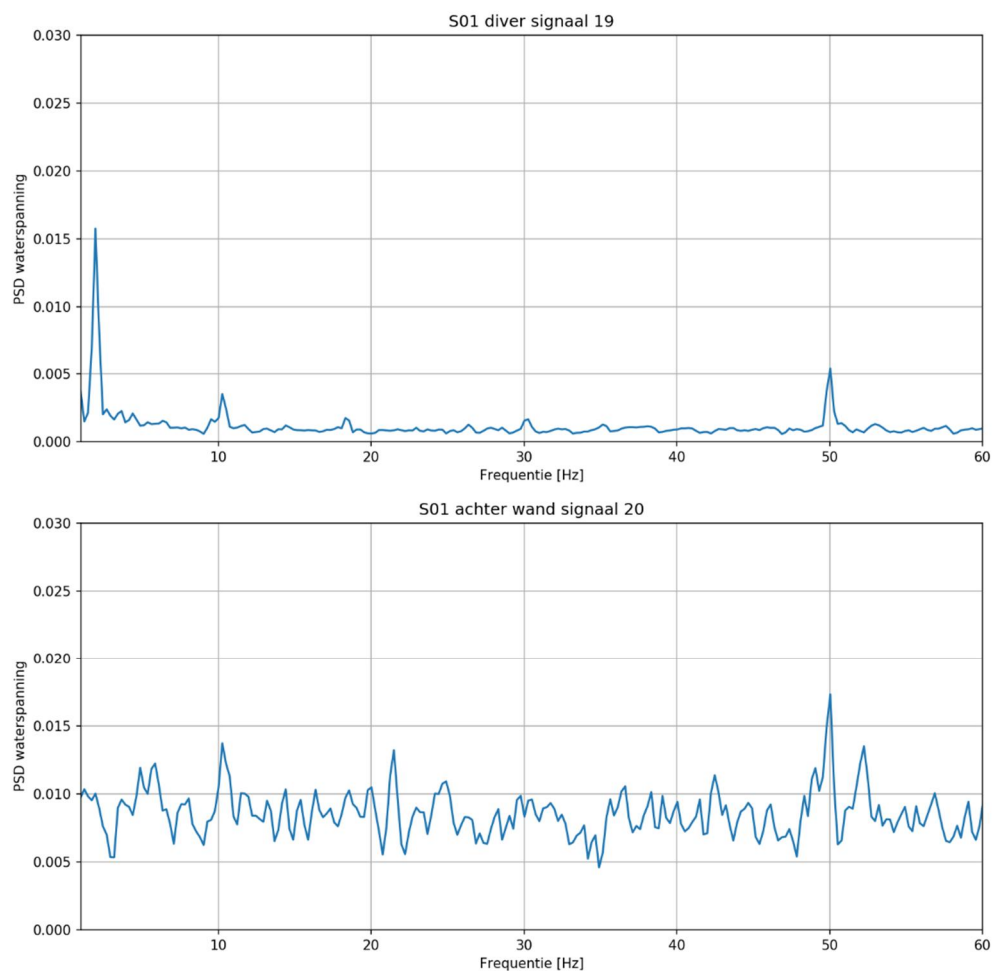
Figuur 5.11 toont de waterdrukken tijdens de passage van schip 1. Het moment van de passage is duidelijk zichtbaar door de waterstandsverlaging tussen 690 en 720 s. Omdat de waterstandsverlaging zelfs wat groter is dan tijdens de passage van schip 2 (S01, zie Figuur 5.6) is de verlaging achter de damwand duidelijker zichtbaar.



Figuur 5.12 Trillingen in de opnemers in de grond voor het pand bij passage S01 schip 1 op 18 juni

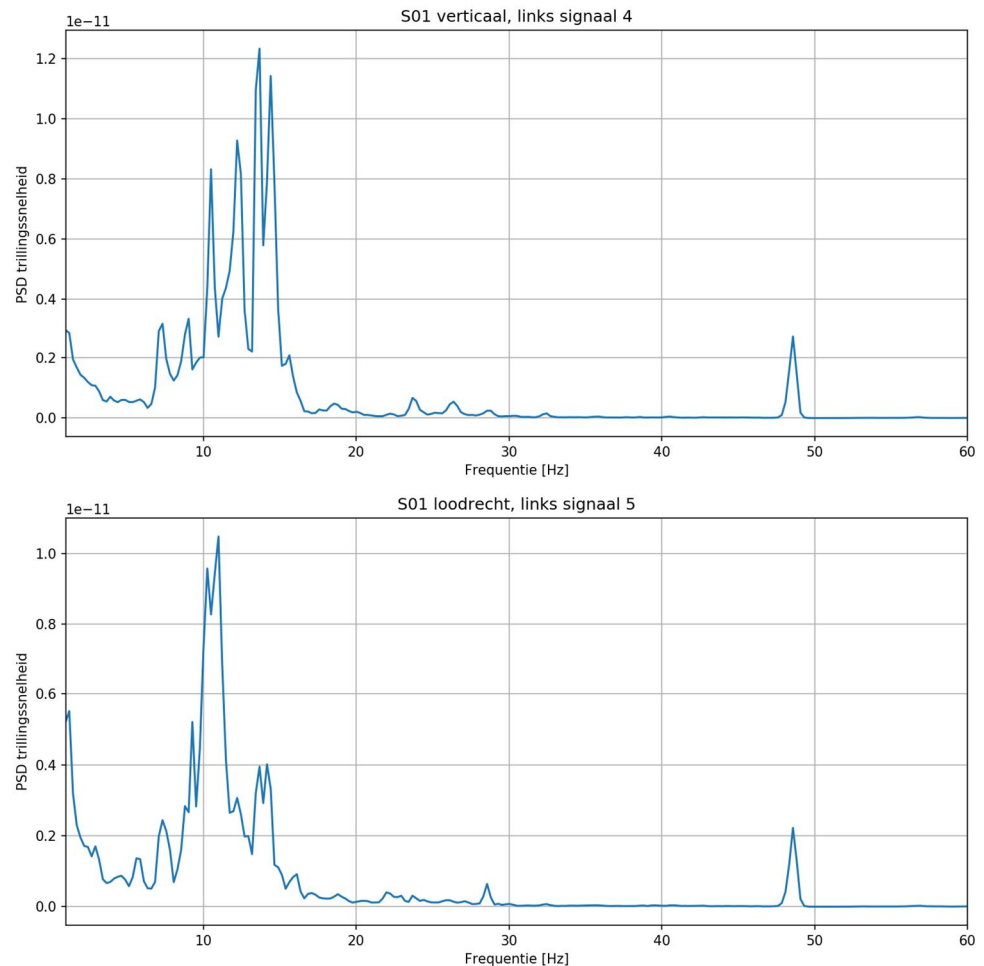
Figuur 5.12 geeft de gemeten trillingssnelheden in de grond weer. De vrachtwagens passeren tussen de 660 en 680 s. Het waterdrukverloop in de diver in Figuur 5.11 geeft aan wanneer het schip passeert. Figuur 5.12 toont dat de trillingen tijdens de passage van het schip heel klein zijn. Figuur 5.11 toont dat de waterspanningen tijdens de passage van de vrachtwagen heel klein zijn.

Figuur 5.13 geeft de spectrale dichtheid van de gemeten waterspanningen en Figuur 5.14 de spectrale dichtheid van de gemeten trillingssnelheden. Spectrale dichtheid is een representatie van de signalen in het frequentiedomein, die specifiek geschikt is voor signalen met veel ruis. De vorm van de Fouriergetransformeerde en de spectrale dichtheid komen in het algemeen redelijk overeen.



Figuur 5.13 Spectrale dichtheid van de waterspanningen in Figuur 5.11

Figuur 5.13 laat zien dat er in de waterspanningen vrijwel volledig sprake is van een ruisvormig signaal met enkele kleine piekjes. Figuur 5.14 geeft de spectrale dichtheid van de trillingssnelheid weer. Hier is duidelijk een signaal zichtbaar in de range 10 Hz tot 15 Hz. Deze wordt volledig veroorzaakt door de vrachtwagenpassages.



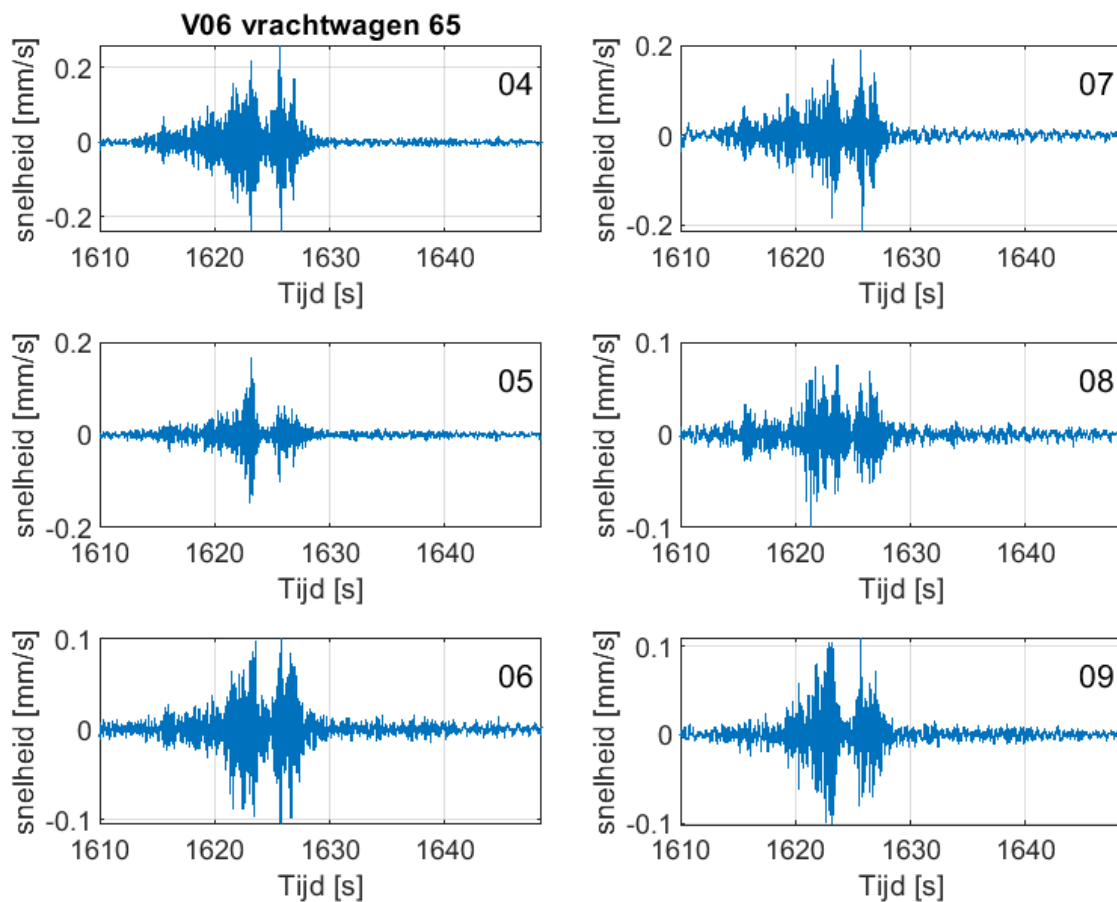
Figuur 5.14 Spectrale dichtheid van de trillingssnelheden in Figuur 5.12

De hoge trillingen in Figuur 5.12 worden dus niet veroorzaakt door de passage van schip 1, maar door de vrachtwagens. De passages van de vrachtwagens veroorzaken geen dynamische waterspanningen

De tijdsignalen in bijlage E (pagina's B10T t/m B30T) geven aan dat dit algemeen geldt.

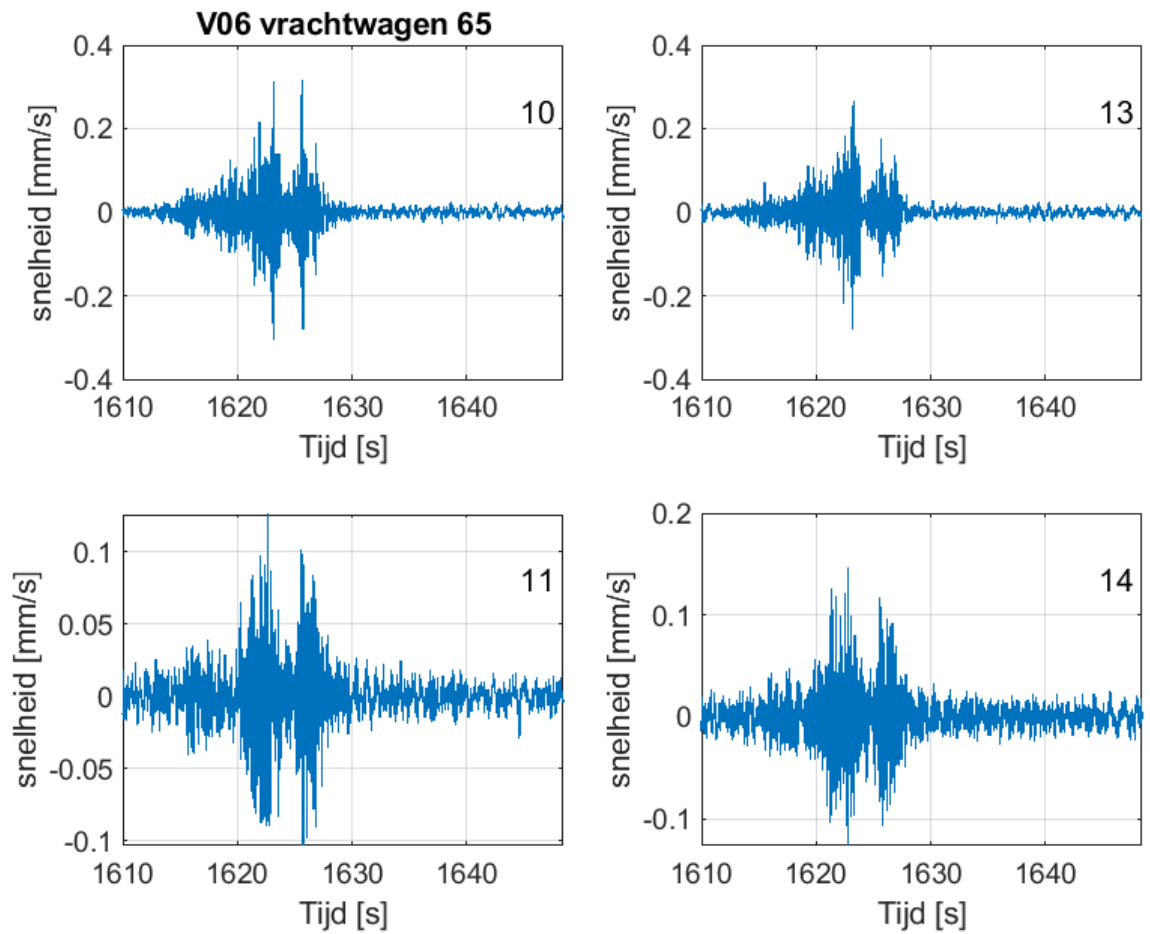
5.7.5.2 Resultaten van de passage van een vrachtwagen

Figuur 5.15 toont de trillingen in de bodem bij passage van een vrachtwagen. Het betreft gebeurtenis V06, waarbij de snelheid ruim boven de toegelaten snelheid lag. Figuur 5.16 en Figuur 5.17 tonen de trillingen voor dezelfde passage van vrachtwagen V06.

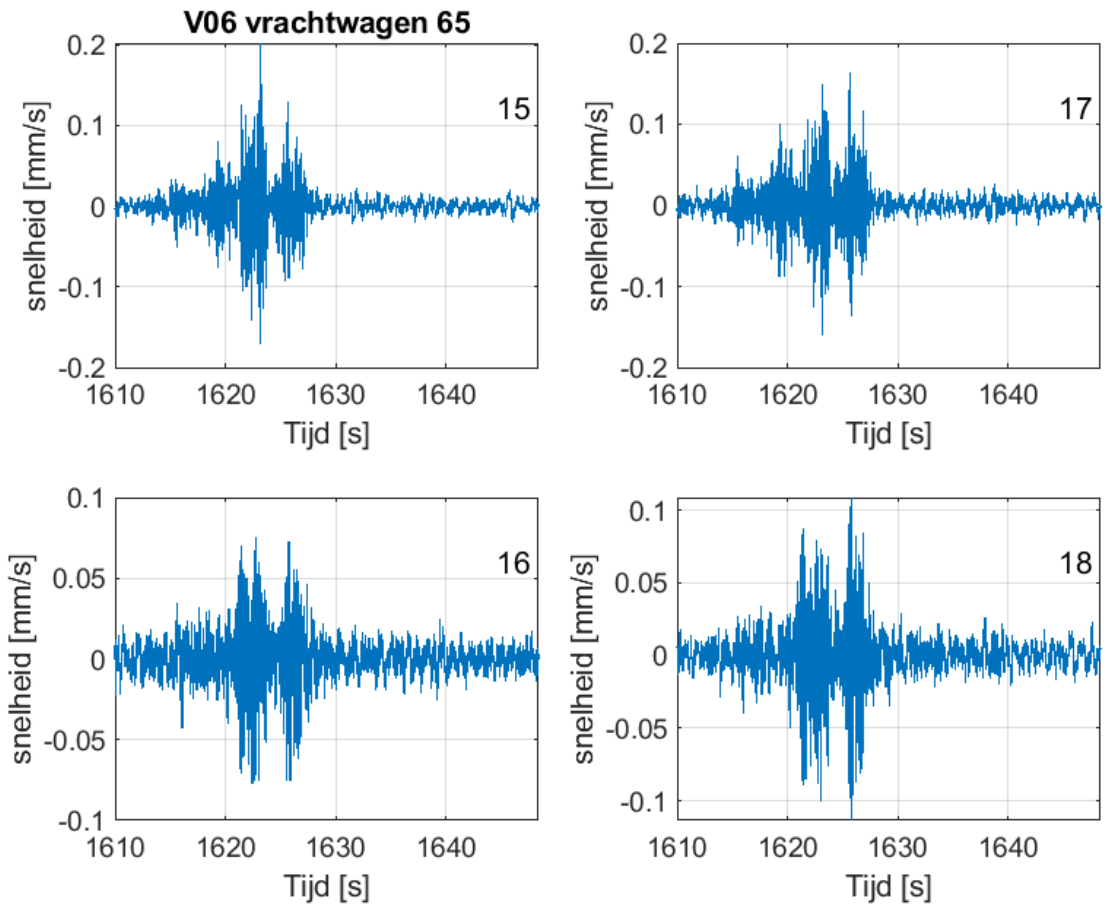


Figuur 5.15 Trillingen in de bodem bij passage vrachtwagen V06 (bovenste rij verticaal, middelste rij horizontaal loodrecht op het kanaal, onderste rij horizontaal evenwijdig aan het kanaal)

Al deze figuren laten duidelijk een kortdurende toename van het trillingsniveau zien als de vrachtwagen passeert. Bijlage G toont dat de waarden voor deze passages in orde grootte redelijk overeenkomen met de resultaten van de passages met de test vrachtwagen (passages V01 - V07) en groter zijn dan de twee passages met gewone vrachtwagens.



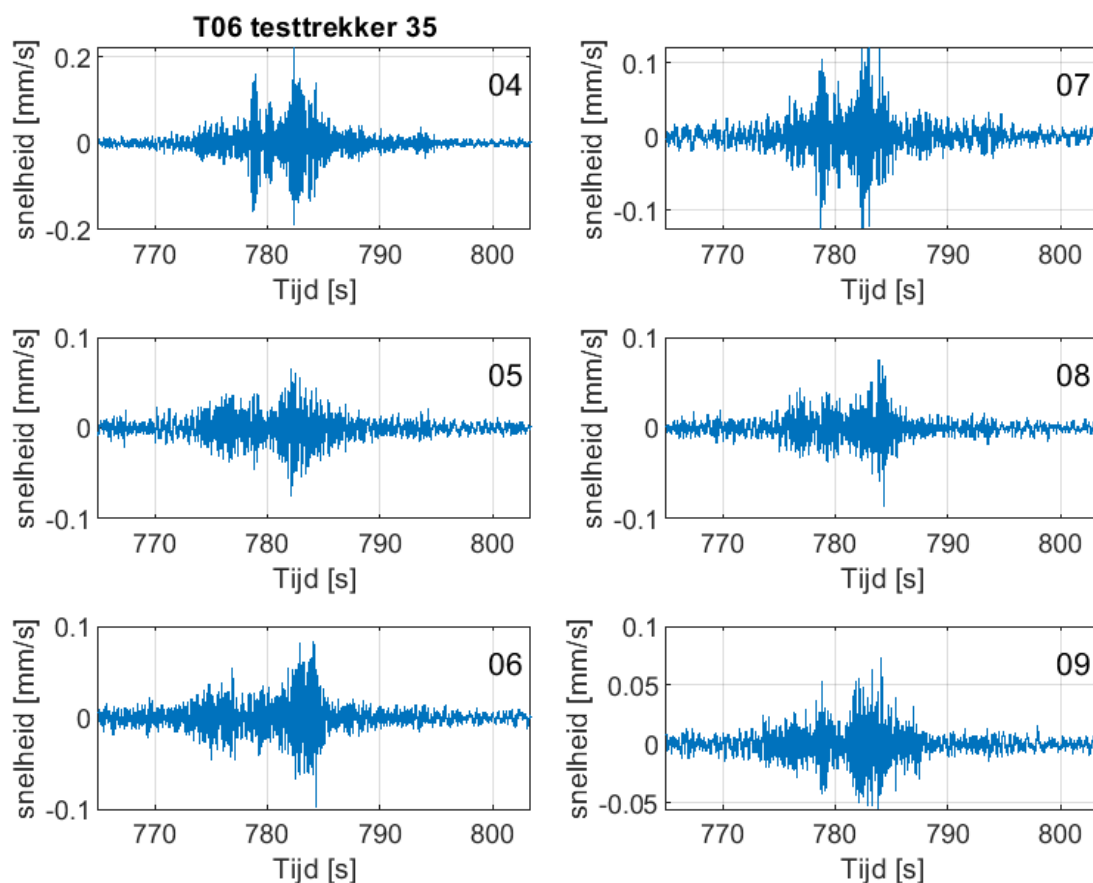
Figuur 5.16 Trillingen aan de gevel bij passage vrachtwagen V06 (bovenste rij verticaal, onderste rij horizontaal loodrecht op het kanaal)



Figuur 5.17 Trillingen in de kelder bij passage vrachtwagen V06 (bovenste rij verticaal, onderste rij horizontaal loodrecht op het kanaal)

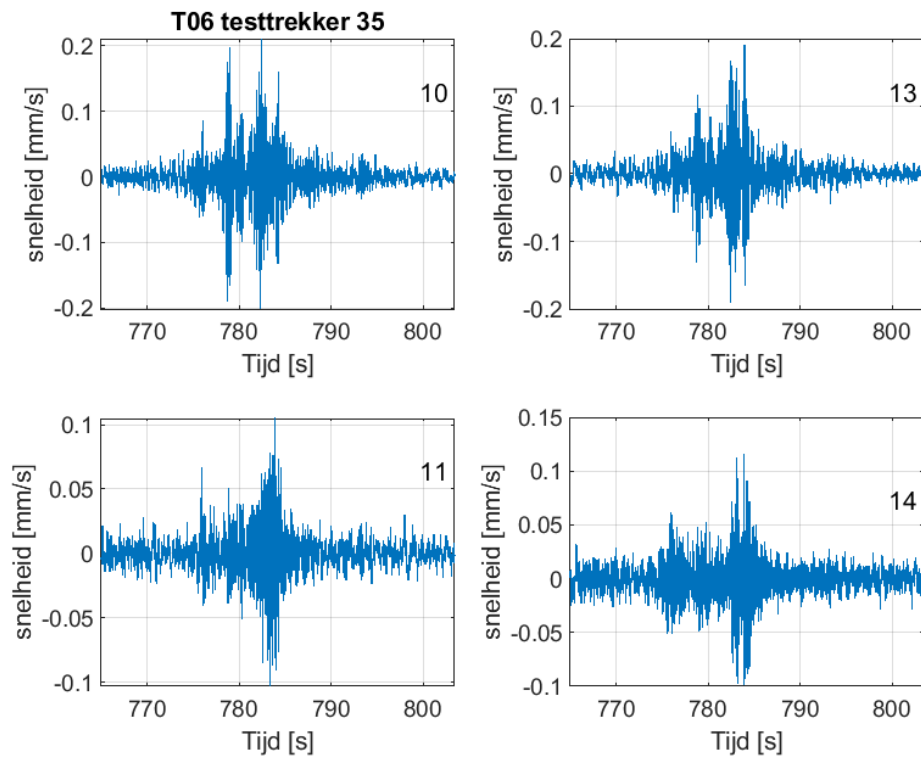
5.7.5.3 Resultaten van de passage van een trekker

Figuur 5.18, Figuur 5.19 en Figuur 5.20 tonen de trillingen ten gevolge van de passages van een trekker in dezelfde punten en richtingen als in de voorgaande paragraaf. Er is gekozen voor passage T06. Dit is een passage van de testtrekker, die met een snelheid van 35 km/u langsrijdt.

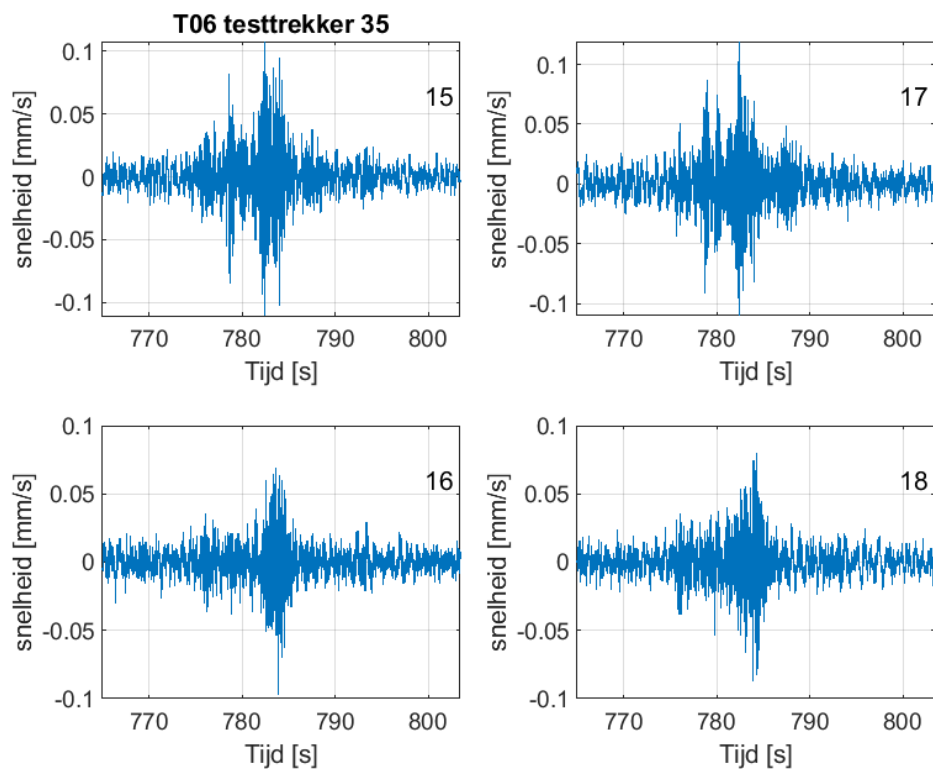


Figuur 5.18 Trillingen in de bodem bij passage trekker T06 (bovenste rij verticaal, middelste rij horizontaal loodrecht op het kanaal, onderste rij horizontaal evenwijdig aan het kanaal)

In deze figuren is de passage van de trekker goed zichtbaar door de verhoging van het trillingsniveau. In alle figuren lijkt het zichtbaar dat er twee delen in de trillingen zichtbaar zijn: het eerste deel wordt dan veroorzaakt door dan de trekker zelf, het tweede deel door de aanhanger.



Figuur 5.19 Trillingen aan de gevel bij passage trekker T06 (bovenste rij verticaal, onderste rij horizontaal loodrecht op het kanaal)



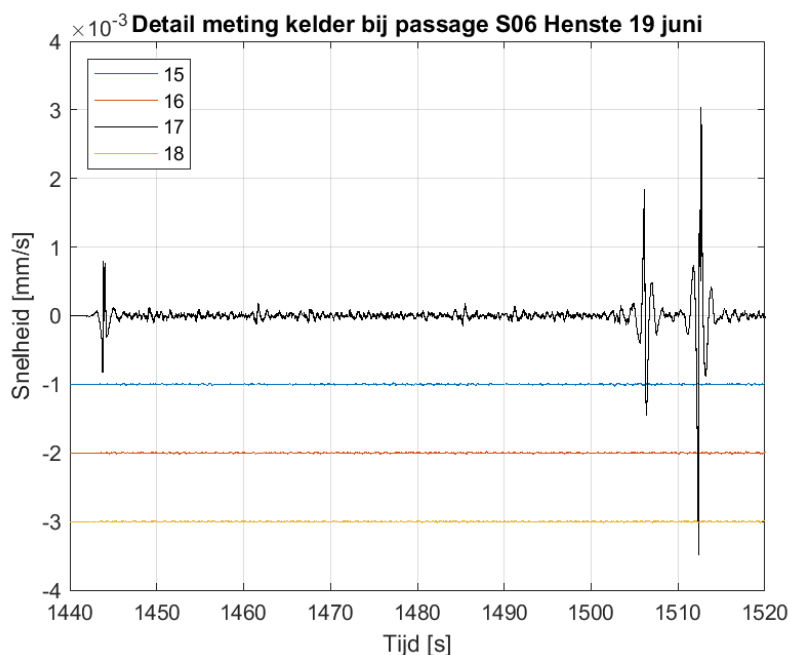
Figuur 5.20 Trillingen in de kleder bij passage trekker T06 (bovenste rij verticaal, onderste rij horizontaal loodrecht op het kanaal)

5.7.6 Beoordeling en discussie

5.7.6.1 Algemene beoordeling

In de tabel in Bijlage G staan de maximale waarden per kanaal voor de drie types gebeurtenissen: passage van een schip, passage van de vrachtwagen en passage van de trekker. Uit deze tabel blijkt dat in de periode van de bemande metingen geen grote verschillen in trillingsniveau per gebeurtenis zijn opgetreden. In het algemeen blijkt dat de maximale trillingen tijdens passages van de vrachtwagen en de trekker (orde 0,3 tot 0,4 mm/s) groter zijn dan de trillingen tijdens het passeren van een schip (orde 0,1 tot 0,15 mm/s).

Tijdens de scheepspassages S06 t/m S09 zijn in signaal 17 extreem hoge verticale trillingen gemeten. Het betreft een verticale trilling in de keldermuur. Omdat tijdens die passages in andere opnemers geen verandering van signaal zichtbaar is, is het niet te verwachten dat deze signalen door een externe bron zijn veroorzaakt. Deze worden daarom als meetfout beschouwd. Figuur 5.21 toont de signalen die tijdens de passage van schip 6 op 19 juni in de kelder zijn gemeten. Het zwart getekende signaal is de verticale opnemer met een aantal puls-vormige signalen. De signalen in de andere opnemers zijn steeds één schaaldeel naar beneden geschoven om de zichtbaarheid te verbeteren. Duidelijk is dat in de andere opnemers geen spoor van een pulsvormig signaal zichtbaar is. Wat ook opvalt is dat in deze periode de ruis in de verticale opnemer hoger is dan in de andere opnemers. In bijlage E, op de pagina's B05T en B05F is ook zichtbaar dat er in alle andere signalen geen afwijkend gedrag zichtbaar is. Tenslotte wordt opgemerkt dat de grootste puls pas optreedt als het schip enige tijd voorbij is (voor 1500 s, zie bijlage E, op pagina B05T). Dit onderbouwt de conclusie dat deze trillingen niet door de passage van het schip, maar door een lokaal verschijnsel vanuit in het huis zelf worden veroorzaakt.



Figuur 5.21 Detail gemeten snelheden in de opnemers in de kelder tijdens de passage van schip 6

Tabel 5.9 geeft voor de passage van schip 2 (S02) en drie proeven met de vrachtwagen de grootste trillingen als functie van de afstand. De trillingen bij passage van de vrachtwagen zijn vergelijkbaar met de trillingen bij passage van de trekker, maar gemiddeld iets groter (zie bijlage G). In het algemeen nemen de trillingen af met afstand, terwijl aan de gevel een kleine versterking lijkt op te treden. De passage van schip 2 gaf de grootste trilling van de waargenomen scheepspassages, maar de trillingen zijn nog aanzienlijk kleiner dan waargenomen tijdens de proeven met het vrachtverkeer.

Tabel 5.9 Overzicht grootste trilling als functie van de afstand voor enkele gebeurtenissen (S02 scheepspassage, Tabel 5.5, V05, V06 en V07 zijn passages van vrachtwagens, zie Tabel 5.6). Afstand in meters, trillingen in mm/s. V = verticaal, HL = horizontaal loodrecht (op het kanaal)

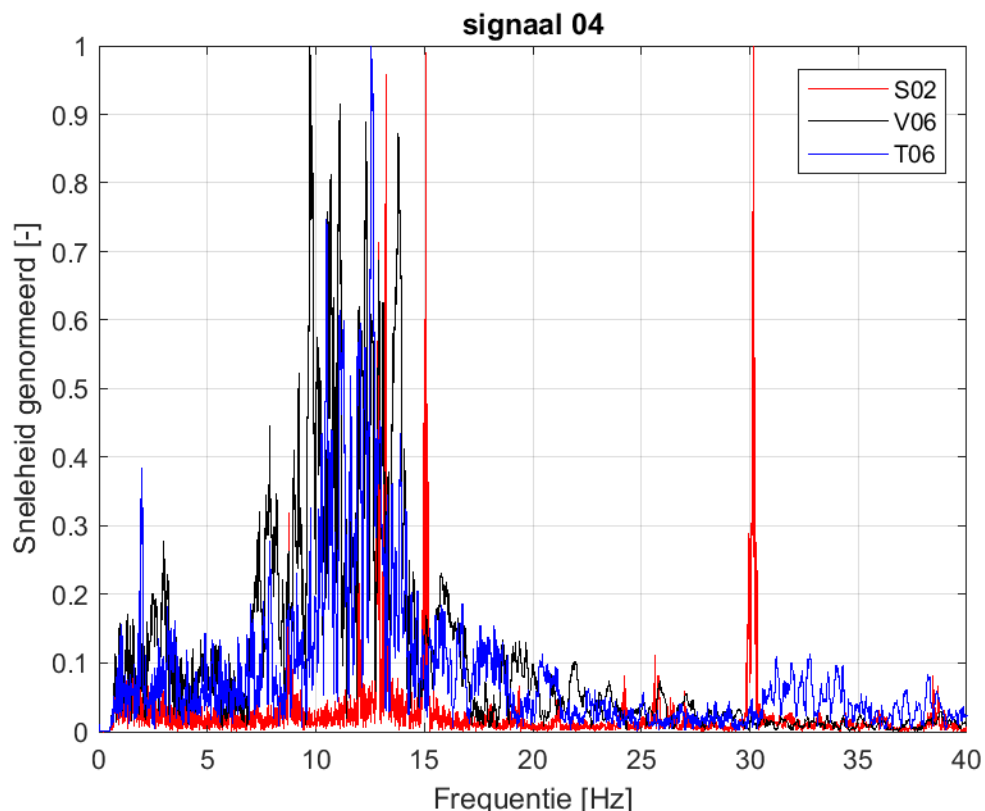
Plaats	Afst.	S02	S02	V05	V05	V06	V06	V07	V07
		V	HL	V	HL	V	HL	V	HL
grond	21	0,14	0,07	0,31	0,10	0,26	0,17	0,29	0,13
gevel	22	0,15	0,08	0,36	0,07	0,32	0,15	0,36	0,21
kelder	26	0,13	0,07	0,21	0,09	0,20	0,11	0,18	0,13
grond	34	0,08	0,05	0,18	0,08	0,14	0,10	0,13	0,06

De trillingsnelheden in de bodem en de omgeving zijn in de orde van 0,1 mm/s tot 0,40 mm/s. In de veronderstelling dat in het pand nog enige versterking kan optreden, kan worden verwacht dat het aannemelijk is dat de passage van de zware schepen kan worden gevoeld in de panden.

Figuur 5.22 toont de frequentie-inhoud voor de verticale trillingsnelheid in de bodem voor de gevel. De grafieken zijn genormeerd op de maximale waarde in elke grafiek, het gaat in dit geval vooral over de verschillen in de vorm. De frequentiekaracteristiek van de vrachtwagen en de trekker komen redelijk overeen. De schepen geven een heel andere karakteristiek. Er is gekozen voor de passage S02 schip 2 op 18 juni. Er zijn een paar hoge pieken in het signaal zichtbaar, de hoogste van alle scheepvaart.

Dit verschil in frequentie is verklaarbaar uit het type bron. Bij wegverkeer ontstaat de trilling door de oneffenheid van de weg in samenhang met de rijsnelheid van het voertuig, waarbij de reactie van de assen en het voertuig (waaronder de belading) bepalen welke frequenties sterker of minder sterk tevoorschijn komen.

Bij de schepen ontstaan de trillingen vermoedelijk door het draaien ('stampen') van de motor en mogelijk het draaien van de schroef in het water. Dit verschilt per schip en is misschien afhankelijk van verkeerssituatie (hard doorvaren, wegvaren, rustig varen).



Figuur 5.22 Vergelijking van de op de maximale waarde genormeerde frequentie-inhoud van de verticale trillingssnelheid in de bodem voor drie passages

De frequentie karakteristiek van de boten wijkt dus wezenlijk af van de frequentie karakteristiek van de verkeerspassages. In bijlage E op de pagina's met een F op het einde is dat zichtbaar voor alle beschouwde gebeurtenissen. De vrachtwagens hebben meestal een gebied met veel frequenties dat piekt bij ongeveer 12 Hz. De boten hebben in het algemeen een redelijk laag frequentie gebied (12- 15 Hz), met vaak enkele scherpe, soms hoge, pieken (b.v. bij 15 en 30 Hz). Een uitzondering is Bijlage E, pagina B00F, maar op dat moment passeert een vrachtwagen vlak voor de passage van het schip. De vrachtwagen overheerst dan het spectrum. Mogelijk hebben deze hoge pieken veel invloed op de beleving van de trillingen, mede omdat deze in het frequentiegebied van laagfrequent geluid liggen, waar de mens gevoelig voor is.

Bij een aantal schippassages treden in de gemeten trillingssnelheid enkele zeer smalle hoge pieken op, zoals te zien is in Figuur 5.22. Deze lijken verklaarbaar door het optreden van eigen trillingen in de schepen en/of door bijvoorbeeld het draaien van de motoren op specifieke frequenties. Deze scherpe pieken zijn niet zichtbaar in de frequentiefuncties van de waterspanningsopnemers. Uit het feit dat ook deze scherpe pieken in het frequentie domein van de waterspanningen niet zichtbaar zijn, moet worden geconcludeerd dat de dynamische waterspanningen zeer klein zijn. Dit aspect wordt uitgebreider besproken in paragraaf 5.7.6.4.

5.7.6.2 Beoordeling volgens de SBR richtlijn A voor schade

Voor de bepaling van de grenswaarden van de trillingen voor schade aan de constructie is uitgegaan van:

- Indeling van de panden in categorie 2: de constructie bestaat uit metselwerk. De laagste karakteristieke waarde V_{kar} is 5 mm/s, voor frequenties boven de 10 Hz is een hogere waarde mogelijk. Daarvoor moet in het frequentiedomein worden gekeken. De dominante frequentie is

de frequentie met de laagste waarde van de verhouding tussen de karakteristieke trillingssnelheid en de snelheid in het frequentiedomein $V(f)$: $V_{kar}/V(f)$ en dus de hoogste waarde van $V(f)/V_{kar}$.

- Er is met twee opnemers op het pand gemeten, er is dus sprake van een beperkte meting. De partiële factor is $\gamma_v = 1,4$ op de gemeten trillingsbelasting.
- De topwaarde van de gemeten trilling is als indicator gebruikt.
- De trillingen zijn opgevat als herhaald kortdurend. De partiële factor is $\gamma_t = 1,5$ op de karakteristieke waarde.
- De bouwkundige staat is als gevoelig, er is sprake van een gevoelig pand. De partiële factor is $\gamma_s = 1,7$ op de karakteristieke waarde. Het is niet meer mogelijk de checklist uit de SBR toe te passen, dit moet voor de trillingsbelasting worden uitgevoerd in verband met de gevolg check. In ieder geval scoort dit pand punten bij de nummers 8 en 10 van de checklist. Het pand als gevoelig benoemen is een voor de bewoners veilige aanname.

De rekenwaarde voor de grenswaarde (voor de trillingssterkte) komt dan uit op $V_r = v_{kar}/(\gamma_t \cdot \gamma_s) = 5/(1,5 \cdot 1,7) = 2,0$ mm/s. De gemeten maximale waarden moeten dan met $\gamma_v = 1,4$ worden vermenigvuldigd om de rekenwaarde voor de trillingsbelasting V_d te krijgen.

Voor de beoordeling van de schade aan de fundering is uitgegaan van:

- Het pand heeft een ondiepe fundering op een zand en moet dus als gevoelig worden beschouwd.
- Een herhaald kortdurende trilling. De partiële factor is $\gamma_t = 1,6$ op de karakteristieke waarde.
- De zandlaag onder de constructie is dik, er is daarom geen gebruik gemaakt van de mogelijkheid om de grenswaarde voor de toelaatbare snelheid te verhogen op basis van de aanwezige laagdikte. Dit betekent dat V_{kar} gelijk aan 10 mm/s is.

De rekenwaarde voor de grenswaarde voor schade aan de fundering komt dan uit op $V_r = v_{kar}/(\gamma_t \cdot \gamma_s) = 10/(1,6 \cdot 1,7) = 3,7$ mm/s. De gemeten maximale waarden moeten dan met $\gamma_v = 1,4$ worden vermenigvuldigd om de rekenwaarde voor de trillingssterkte V_d te krijgen. De gemeten versnelling mag na vermenigvuldigd met de partiële factor γ_v niet boven de 1 m/s² komen.

Deze controles moeten voor alle passages worden uitgevoerd voor de signalen 10-14 die aan de voorgevel zijn gemonteerd (zie Figuur 5.5). De waarden uit de tabel in bijlage G moeten voor schade aan de constructie met 1,4 worden vermenigvuldigd. De hoogste waarde is 0,36 (zie ook in Tabel 5.9), dus de rekenwaarde voor de trillingsbelasting wordt $V_d = 1,4 \cdot 0,36 = 0,5$ mm/s. Dit is ruim onder de toegestane 2 mm/s. Er is daarom geen schade aan de constructie te verwachten.

Aangezien de rekenwaarde voor de snelheid voor schade aan de fundering hoger is dan voor schade aan de constructie, wordt ook aan die toets voldaan. De hoogste versnelling die is gemeten tijdens de scheepspassages is 0,013 m/s², tijdens de passage van de vrachtwagens 0,043 m/s² en tijdens de passages van de tractoren (ook) 0,043 m/s². Vermenigvuldigd met de partiële factor 1,4 blijft dit ruim onder de 1 m/s². Er is daarom geen schade aan de fundering te verwachten.

Tabel 5.10 geeft een samenvatting van resultaten voor de beoordeling volgens de SBR-richtlijn A.

Tabel 5.10 Samenvatting berekening volgens SBR richtlijn A voor passages boten en voertuigen prioriteitspand, bemande meting

Sterkte		Belasting	
Karakteristieke snelheid	5 mm/s	trilsnelheid schip	0,15 mm/s
Type trilling γ_t	1,5	trilsnelheid vrachtwagen	0,36 mm/s
Bouwkundige staat γ_s	1,7	trilsnelheid trekker	0,36 mm/s
		Type meting γ_v	1,4
Rekenwaarde sterkte	2,0 mm/s	Rekenwaarde belasting	0,5 mm/s
maximale versnelling	1 m/s ²	versnelling schip	0,013 m/s ²
		versnelling vrachtwagen	0,043 m/s ²
		versnelling trekker	0,043 m/s ²
		Type meting γ_v	1,4
Rekenwaarde sterkte	1 m/s ²	Rekenwaarde belasting	0,06 m/s ²

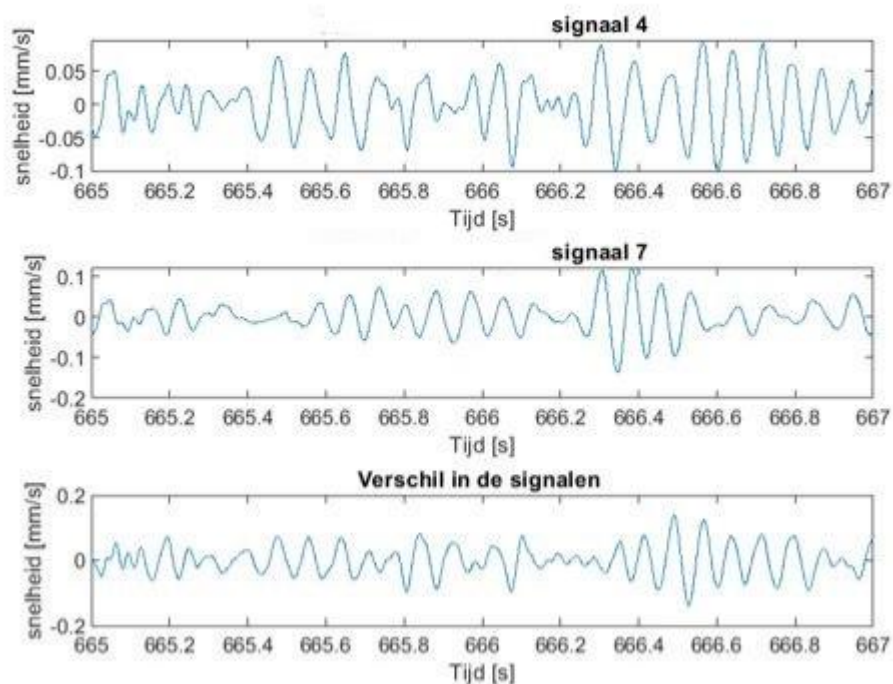
Aanvullende opmerkingen:

- Omdat bij hogere dominante frequenties een hogere toelaatbare waarde wordt gevonden heeft het geen zin om de dominante frequentie verder in deze beoordeling te betrekken.
- Formeel zouden alle gebeurtenissen in de meetperiode moeten worden bekeken. Gezien de grote marge tussen de resultaten en de grenswaarden wordt niet verwacht dat deze beoordeling tot een nader resultaat zal leiden. Dit valt buiten het kader van dit onderzoek. Dit aspect wordt wel verder uitgewerkt in paragraaf 5.8.

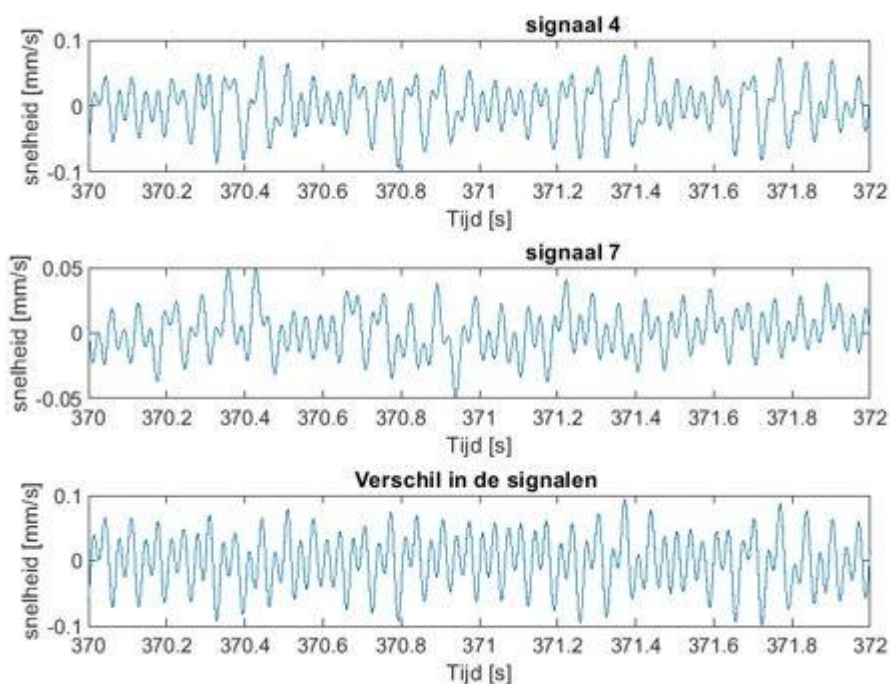
5.7.6.3 Opmerkingen

Sommige schepen geven een trilling met een zeer specifieke frequentie in de range van 10-30 Hz, zie de figuren B01F tot en met B09F in het frequentiedomein in bijlage L. De bijbehorende signalen kunnen wezenlijk verschillen, zoals ook blijkt uit de verschillen tussen Figuur 5.23 en Figuur 5.24. Het is mogelijk dat deze trillingen door bewoners worden ervaren (gevoeld of gehoord) en als hinderlijk worden ervaren. De beleving kan dan ook per schip en per passage sterk verschillen. Deze beoordeling is geen onderdeel van de hier uitgevoerde metingen. In paragraaf 5.8 wordt een meting besproken die wel aandacht aan de hinder besteed.

Een andere vraag is de representativiteit van de metingen. Meestal wordt de representativiteit betrokken op de variatie in de bron (b.v. vaarsnelheid, belading van het schip, precieze vaarweg etc.), maar ook wijzigingen in het transmissie systeem bodem kunnen een rol spelen. In deze situatie kan worden gedacht aan de invloed van de grondwaterstand en aanwezige gewichtsverdeling in een pand. De trillingen die worden gemeten zijn ontstaan door de gevolgen van verschillende golven die interfereren om de meetpositie en de reactie van een systeem (bijv. een vloer) op de aanwezige trillingen. Kleine veranderingen in een dynamische systeem kunnen grote gevolgen hebben, met name in de omgeving van eigenfrequenties die weinig demping hebben. Daarbij is het onzeker of tijdens de meetsituatie een hoger of een lager trillingsniveau is geweest dan tijdens een hoge grondwaterstand. De kans op een dergelijke bijzondere situatie is klein. De verwachting is dat een dergelijke situatie bij een specifiek pand kan optreden, maar dat dit zeker geen verklaring kan zijn voor grootschalige schade oorzaken.



Figuur 5.23 Detail verticale trillingen in de grond bij passage schip 1 op 18 juni. De bovenste figuren geven de signalen weer, de onderste figuur het verschil in de signalen



Figuur 5.24 Detail verticale trillingen in de grond bij passage schip 2 op 18 juni. De bovenste figuren geven de signalen weer, de onderste figuur het verschil in de signalen

- 5.7.6.4 Zettingen door verdichting van zand en dynamische of cyclische waterspanningen
In deze meting is getoetst of er mogelijk verdichting van het zand optreedt als gevolg van of dynamische of cyclische waterspanningen. De trillingen kunnen dynamische of cyclische

waterspanningen veroorzaken. Deze waterspanningen leiden tot een verlaging van de sterkte van het zand. Verdichting door het wegvloeien van deze waterspanningen leidt tot zettingen. De SBR-richtlijnen geven grenswaarden voor de trillingssnelheid die gebaseerd zijn op de trillingen die in het pand worden gemeten. In dit geval zijn de trillingen en waterspanningen direct in de bodem gemeten, dus daar waar de verschijnselen daadwerkelijk kunnen optreden.

De waterspanningsopnemers geven aan dat er geen waterspanningen optreden boven het aanwezige ruisniveau. Het ruisniveau is orde 5 hPa (amplitude, dus 10 hPa dal-piek waarde). De optredende waterspanningen blijven daar dus ruim onder. De variatie in de waterspanning komt overeen met een variatie in de waterstand van orde enkele cm. Dit heeft geen invloed op de stabiliteit van de woning.

5.7.7 Conclusie

De metingen geven geen indicatie dat de trillingen die door de zwaardere schepen ontstaan aanleiding geven tot het ontstaan van schade aan de bebouwing. De rekenwaarde voor de grenswaarde voor een herhaald voorkomende trilling is minimaal $V_r = 2,0$ mm/s met de veronderstelling dat het pand in categorie 2 valt en dat het pand in gevoelige bouwkundige staat verkeert. De gemeten trillingen moeten met de partiële factor voor het type trilling worden vermenigvuldigd, die in dit geval 1,4 (beperkte meting). Dit houdt in dat de gemeten topwaarde van de snelheid (V_{top}) kleiner moet zijn dan 1,4 mm/s. De hoogste in deze meting waargenomen trilling V_{top} tijdens de scheepspassages is 0,13 mm/s. Dit is orde een factor 10 onder de toelaatbare waarde voor schade. De hoogste trilling die werd veroorzaakt door de langsrijdende vrachtwagen en trekker met aanhanger was 0,36 mm/s. Dit is een factor 4 kleiner dan de toelaatbare waarde voor schade.

Het lijkt niet zinvol om bij andere panden vergelijkbare waterspanningsmetingen voor schade uit te voeren in welke vorm dan ook.

De trillingen in de bodem en het pand zijn zodanig dat de trillingen van grotere schepen in het pand de voelbaarheidsdrempel volgens SBR richtlijn B (orde 0,1 mm/s) kunnen overschrijden. Dat wordt in de volgende paragraaf nader bekeken met twee opnemers op de vloer.

De duur van de meting is nog een beperking. De bewoners geven aan dat een enkel groot, zwaar beladen schip veel hogere trillingen kan geven. Mogelijk is een dergelijk schip in deze periode niet gepasseerd, al worden door de omwonenden schip 1 en schip 2 wel doorgaans als belastende boten met grote trillingen aangewezen. De grootste trilling kan alleen worden beoordeeld door een langere meting uit te voeren. Deze is in hetzelfde pand uitgevoerd met een eenvoudigere meetopstelling, beschreven in paragraaf 5.8.

Daarnaast wordt met een drietal extra metingen nagegaan of deze conclusies meer algemeen gelden. Deze worden beschreven in paragraaf 5.9.

5.8 Onbemande metingen aan en bij een prioriteitspand gedurende 4 weken

5.8.1 Doel van de monitoring

Deze monitoring is uitgevoerd omdat de indruk bestaat dat de werkelijke overlast veroorzakende schepen niet zo vaak passeren en daardoor mogelijk buiten de meetperiode van de bemande meting vallen. De vraag luidt dan ook: is de eerdere meetperiode voldoende representatief geweest?

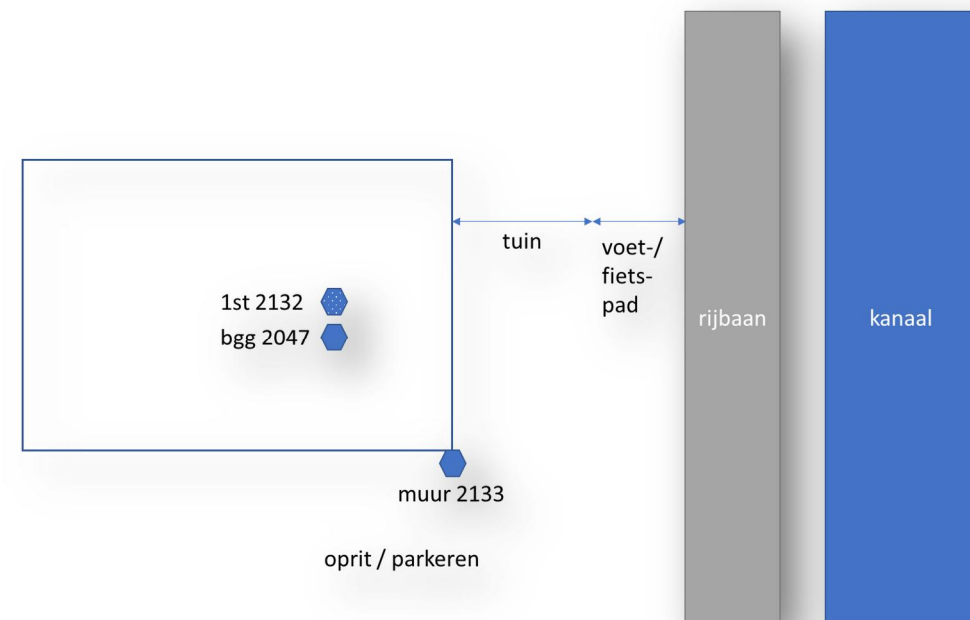
Deze vraag valt uiteen in twee delen:

- Zijn de trillingen tijdens de bemande meting representatief voor de passages van schepen en verkeer.
- Zijn er andere externe bronnen actief die in de periode van de bemande meting niet actief zijn geweest.

Tevens geeft deze nieuwe meetcampagne een beter inzicht in de correlatie tussen water-spanningen in de ondergrond direct ter plaatse van het pand en de opgetreden trillingen over een langere periode dan de bemande metingen. Hierbij moet worden opgemerkt dat de waterspanningsmeters nog zes maanden zullen blijven staan om de variatie van grondwaterstand te kunnen monitoren.

5.8.2 Werkwijze van de monitoring

Er is standaard meetapparatuur geplaatst van het type Vibra van de firma IFCO. Deze zijn specifiek bedoeld om gedurende langere tijd trillingen te monitoren en slaan alleen de maatgevende gebeurtenissen op. Er is één opnemer geplaatst op de muur, op vrijwel dezelfde locatie als de versnellingsopnemers van Deltares. Daarnaast zijn er twee opnemers geplaatst op de vloer in de woonkamer en in de slaapkamer. Figuur 5.25 geeft een globale schets van de meetopstelling.



Figuur 5.25 Schets opnemers onbemande meting bij het prioriteitspand (niet op schaal)

De volgende opnemers zijn geplaatst:

- 2047 midden in de woonkamer begane grond.
- 2132 midden in slaapkamer 1st verdieping.
- 2133 zuidhoek oostgevel (40 cm uit de hoek, 55 cm boven mv).

De opnemer aan de gevel (2133) wordt in deze paragraaf met 'muur' aangeduid. Er is in dit geval gekozen voor twee opnemers voor hinder en één voor schade, omdat in de bemande meting al zeer uitgebreid aandacht aan het aspect schade was besteed. De onbemande

meting duurt langer en had o.a. tot doel om te beoordelen of de periode van de bemande meting voldoende representatief was. Voor dat doel maakt de plaats van de opnemer niet wezenlijk uit.

5.8.3 Resultaten van de monitoring

5.8.3.1 Algemeen

Het idee was dat het pand gedurende deze tijd niet bewoond zou zijn, maar dat was wel het geval. Daardoor zijn er veel verstoringen van de metingen geweest en zijn de opnemers enige tijd uitgeschakeld geweest. Daarnaast zijn er problemen geweest met de internet applicatie voor het online beoordelen van de trillingen.

De volgende periodes worden onderscheiden:

van/ tot datum	situatie
17 juni	start metingen.
20 juni	alles staat aan, trillingsmeting Deltares loopt mee.
1 juli	alles staat aan, extreem veel storingen in opnemers op vloer.
4 juli	alleen de opnemer op de muur staat aan.
13 juli	niets werkt.
14 juli	woonkamer vloer opnemer werkt weer.
19 juli	beide vloer opnemers werken.
23 juli	apparatuur verwijderd.

In Bijlage I is de standaard verwerking door IFCO gepresenteerd. Er zijn twee delen voor de resultaten van de opnemer op de muur. Omdat de batterij leeg is geweest is het tweede meetbestand gestart op 1 jan 2010.

Bijlage I.1 geeft alle gemeten trillingssnelheden als functie van de tijd. In alle opnemers zijn hoge tot extreem hoge trillingen zichtbaar. In elke opnemer wordt de toelaatbare waarde overschreden. De trillingen zijn zo extreem en variabel dat moet worden nagegaan welke trillingen fysisch relevant zijn voor de probleemstelling.

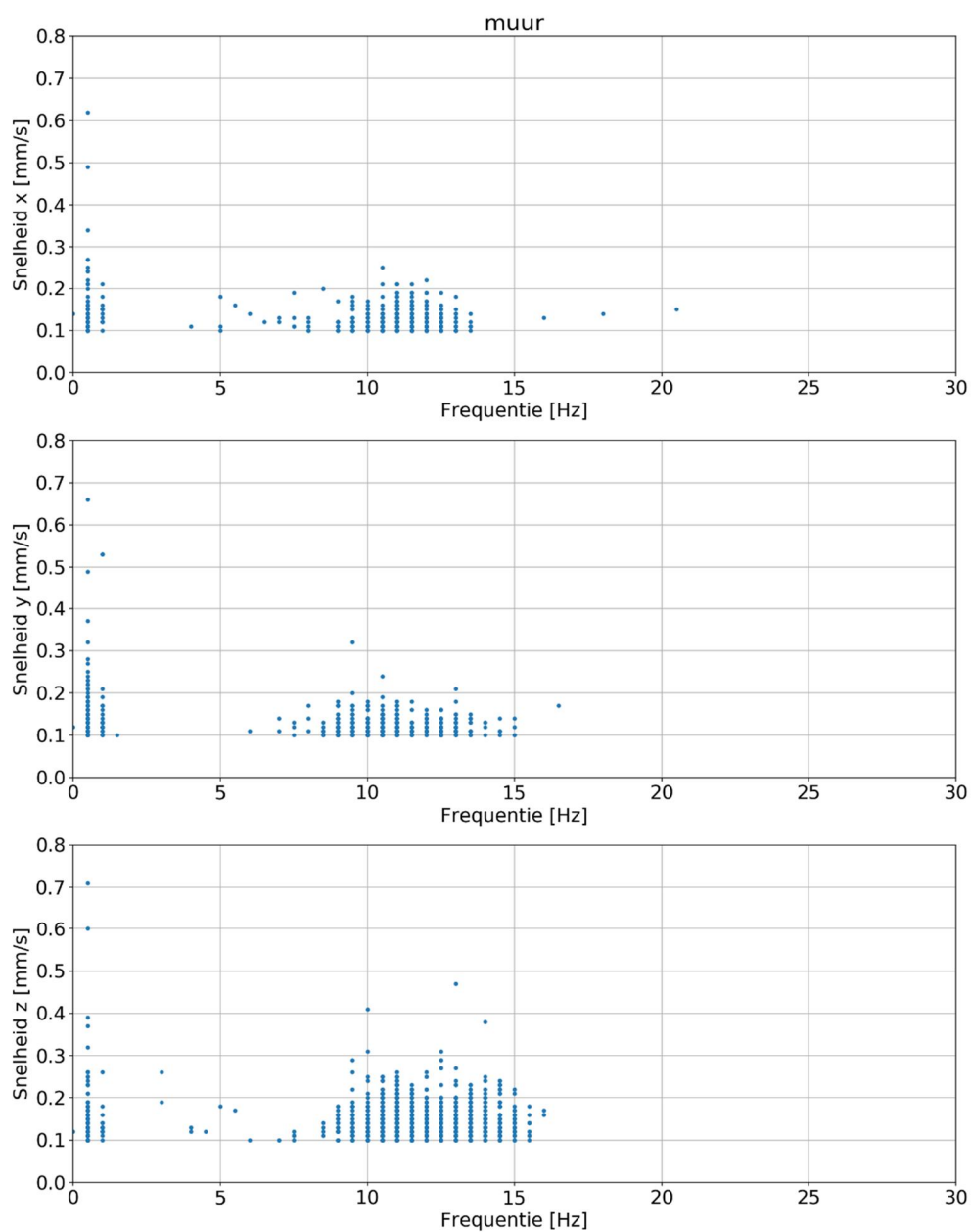
De standaard verwerking gaat uit van een beperkt aantal maatgevende gebeurtenissen, maar dat zijn steeds de verstoringen geweest. Dit is zichtbaar doordat steeds één opnemer extreem grote trillingen geeft. Hierbij moet gedacht worden aan langslopen of stoten e.d. en ook het aan en uitschakelen van de apparatuur, omdat deze niet kon blijven functioneren als de jonge kinderen in de kamers speelden. Er is een nieuwe interpretatie slag uitgevoerd om zoveel mogelijk informatie uit de trillingsmetingen te halen.

5.8.3.2 Analyse opnemer aan de muur: Schade

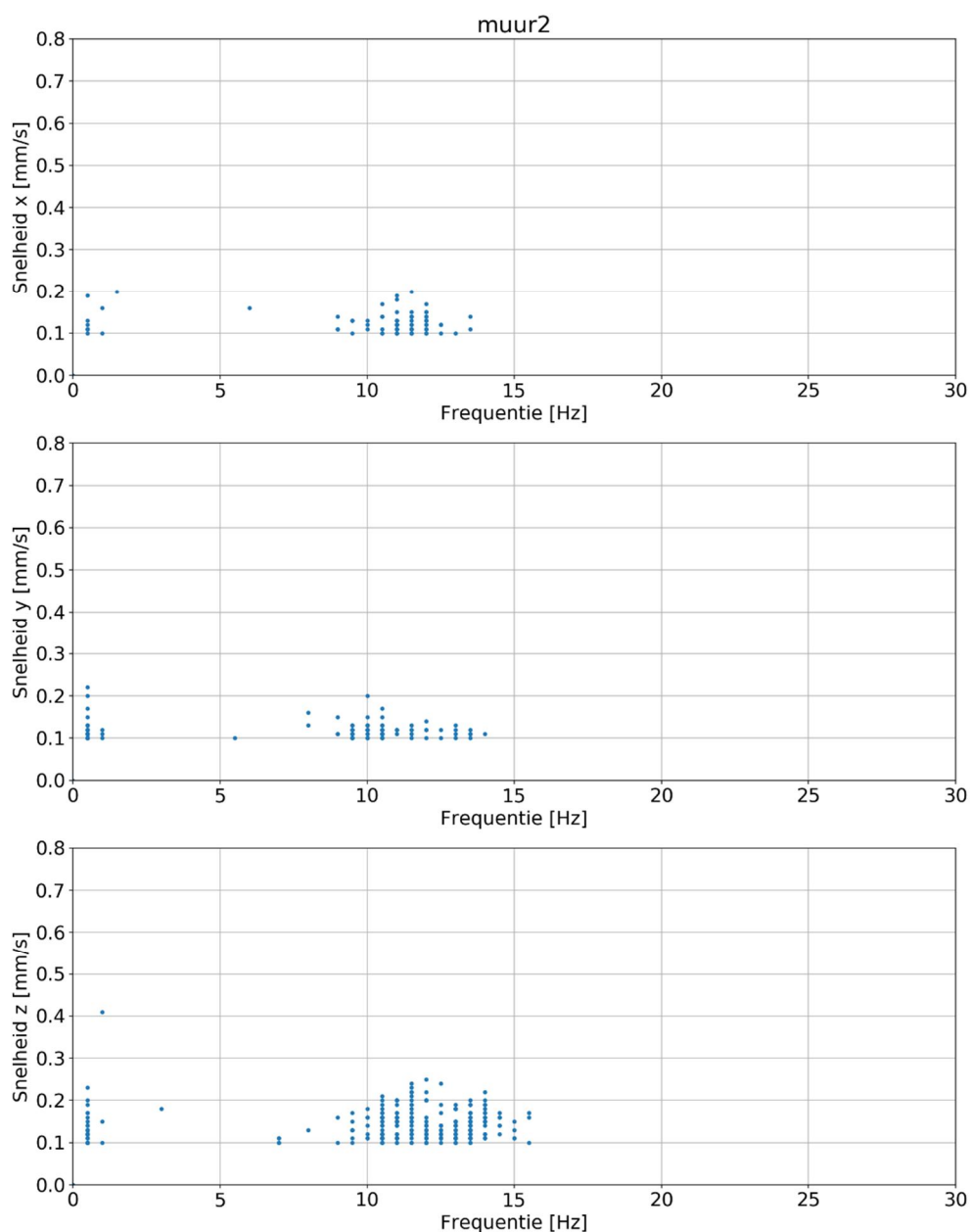
In eerste instantie zijn voor alle opnemers en alle richtingen de trillingen geselecteerd waarbij een trillingssnelheid groter dan 2 mm/s is gemeten. Het gaat hier over de v_{top} en de $v_{eff,max}$ waarde. Op de muur zijn 9 overschrijdingen geconstateerd (geteld 12, maar 3 hebben versnelling 0, dit zijn inschakel momenten), Op de vloer b.g.g. zijn 44 overschrijdingen geconstateerd (geteld 49, maar 5 hebben versnelling 0) en op de vloer 1st zijn 1054 overschrijdingen geconstateerd (geteld 1057, maar drie hebben versnelling 0). Hierbij moet worden opgemerkt dat er geen onderscheid is gemaakt in trillingsrichting, zodat soms één trilling driemaal geteld kan zijn. De tijdstippen met de hoge trillingen op de muur zijn handmatig vergeleken met de trillingen op de vloer op dezelfde tijdstippen. Hierbij blijkt dat er geen hoge trilling in de vloeren optreedt. Dezelfde verwerking is uitgevoerd met trillingen boven de 0,8 mm/s. Deze uitwerking heeft hetzelfde resultaat. Er is één trilling op de muur die op een vergelijkbaar moment in één vloer op de 1^{ste} een hoge trilling optreedt. De vloer van de b.g.g. is echter stil. Hieruit blijkt dat deze hoge trillingen op de muur zeer lokaal optreden en geen externe oorzaak hebben, omdat bij een externe oorzaak alle delen van het hele pand in trilling zullen komen.

De trillingen onder de 2 mm/s zijn getoond in Figuur 5.26 en Figuur 5.27. Op de horizontale as staat de frequentie en op de verticale as de gemeten topwaarde van de snelheid. De grenswaarde voor deze situatie is bepaald in paragraaf 5.7.6.2 op 2 mm/s. De partiële factor is $\gamma_v = 1,6$ op de gemeten trillingssterkte, omdat nu slechts met één opnemer is gemeten. De hoogste waarde is 0,7 mm/s. Rekening houdend met de partiële factor 1,7 is de rekenwaarde 1,2 mm/s. Dit is ruim onder de grenswaarde.

Deze meting met andere apparatuur geeft voor de beoordeling van de schade hetzelfde resultaat als in paragraaf 5.7.6.2.



Figuur 5.26 Trillingen op de muur in de eerste periode



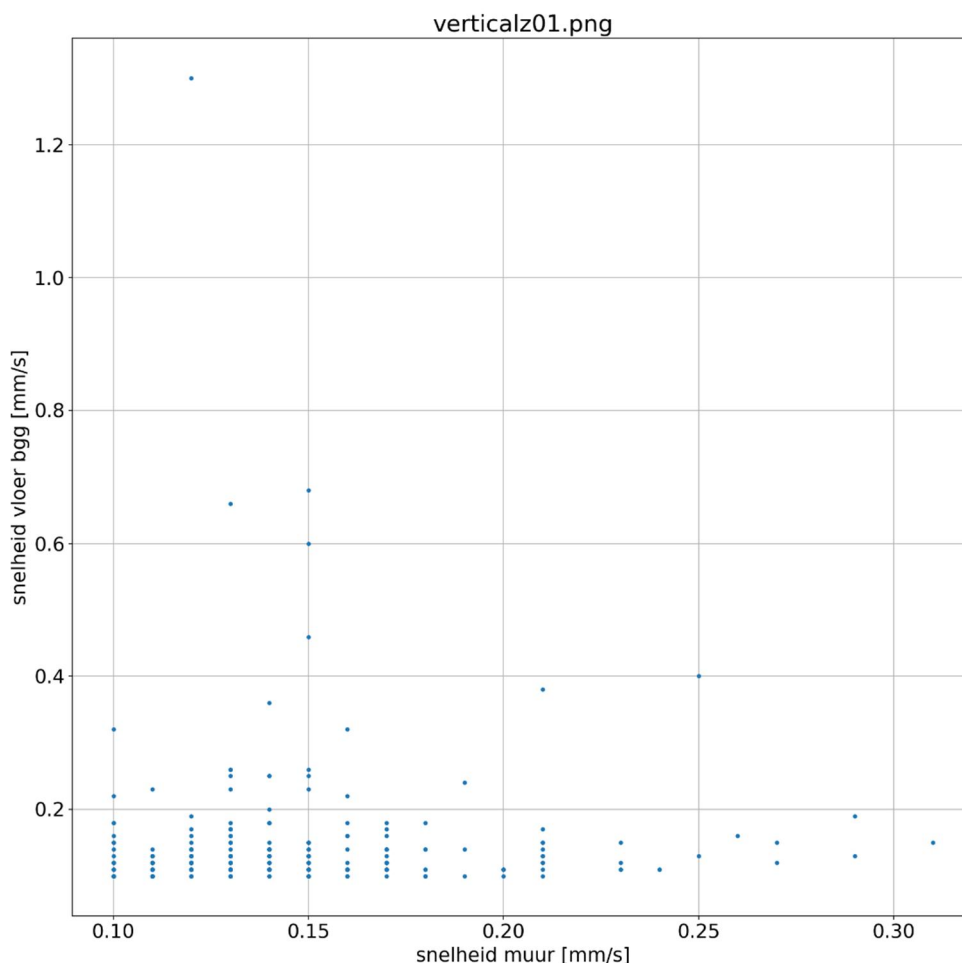
Figuur 5.27 Trillingen op de muur in de tweede periode

5.8.3.3

Analyse van de opnemers op de vloer: hinder

Er is een analyse gedaan om uit de metingen op de vloeren te bepalen welke trillingen zichtbaar zijn in het hele pand. Alle trillingen met $v_{\text{eff,max}}$ boven de 0,1 mm/s zijn gecontroleerd op gelijktijdigheid. Deze 0,1 mm/s is normaal de drempel waarde voor de opslag van de resultaten: de apparatuur slaat een gemeten snelheid onder dit niveau niet op. Voor deze meting is de drempelwaarde iets verlaagd. De resultaten van de apparatuur geven de gemeten maximale waarde over een interval van 10 sec weer. De klokken worden bij de start van de meting door de leverancier gesynchroniseerd. Er is verondersteld dat er enige verschuiving optreedt gedurende de metingen. Daarom is gelijktijdig gekozen dat de trillingen binnen een 15 sec interval moeten vallen. Dat betekent dat de trilling in het voorafgaande, hetzelfde of het volgende tijdsinterval moet liggen. Volgens de leverancier is dit een realistisch interval. Naast gelijktijdigheid is voor de analyse geëist dat de trilling in de vloer maximaal een factor 50 hoger of een factor 3 lager is dan

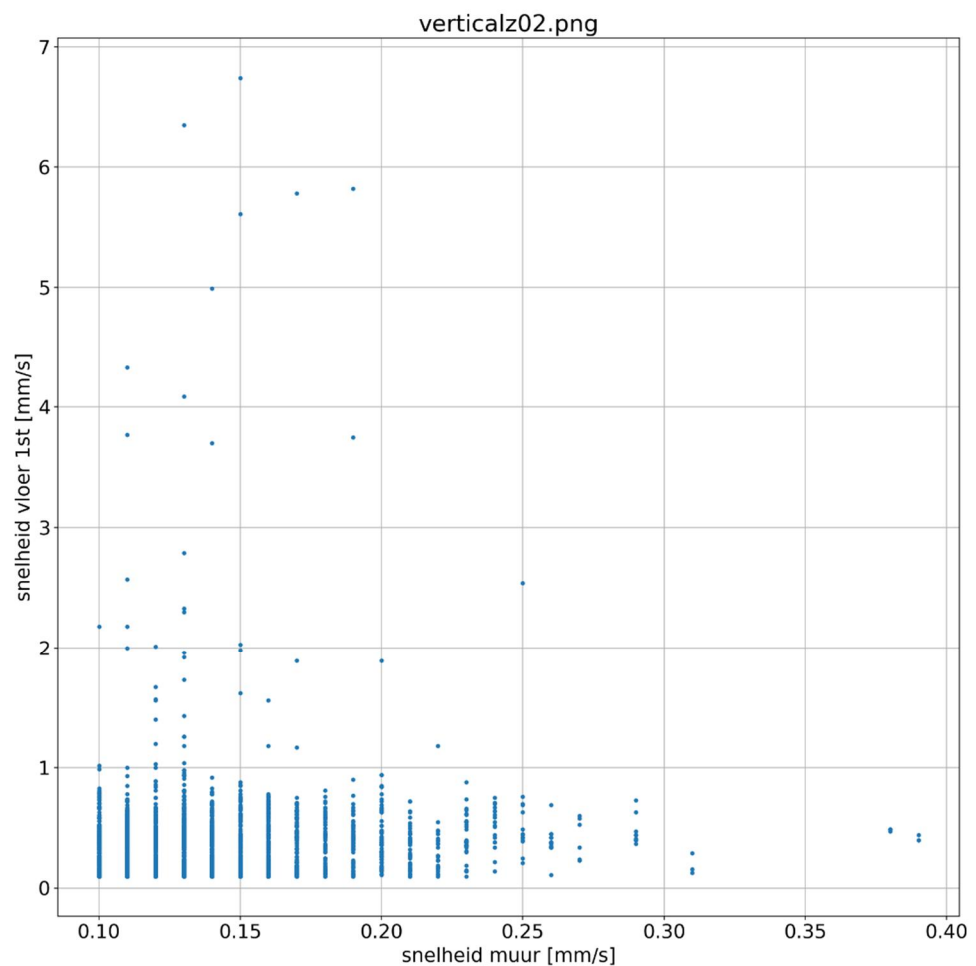
de trilling aan de wand. Een maximale versterkingsfactor van 50 lijkt een redelijk extreme keuze om resonanties in de vloer te beschrijven, maar deze is toegepast om de irrealistische versterking van trillingen uit de data te houden. Een lage waarde geeft het risico dat er fysisch relevante trillingen niet in de data verschijnen, een hoge waarde geeft het risico dat er fysisch irrelevante trillingen in de data verschijnen.



Figuur 5.28 Verticale trillingen op de vloer van de begane grond bij gelijktijdige trilling aan de muur

Figuur 5.28 en Figuur 5.29 tonen de resultaten. Deze figuren zijn op ongelijke horizontale en verticale schaal getekend. Indien er sprake is van causaliteit dan brengt de muur de vloeren in trilling. Indien er een versterking van de trillingen optreedt, dan zouden deze figuren min of meer een lijn moeten gaan vormen, waarbij de helling van de lijn een maat voor de versterking is.

Bij een dynamisch systeem is dit niet helemaal waar, omdat de frequentie een rol kan spelen. De vloer is een lichtgedempt dynamisch systeem. Bij belasting in de eigenfrequentie kan een dergelijk systeem opslinging vertonen, waardoor in specifieke frequentiebanden een grote versterking van trillingen ontstaan, terwijl die bij andere frequenties niet optreedt. Dit betekent dat de type bron een rol speelt. Dit komt overeen met de bewering van de bewoners dat specifieke passages de problemen veroorzaken.

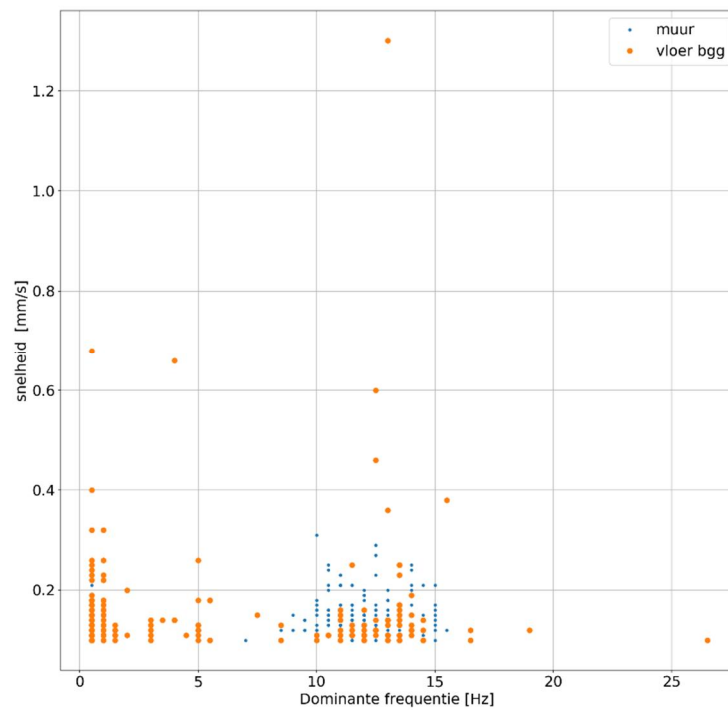


Figuur 5.29 Verticale trillingen op de vloer van de eerste verdieping bij gelijktijdige trilling aan de muur

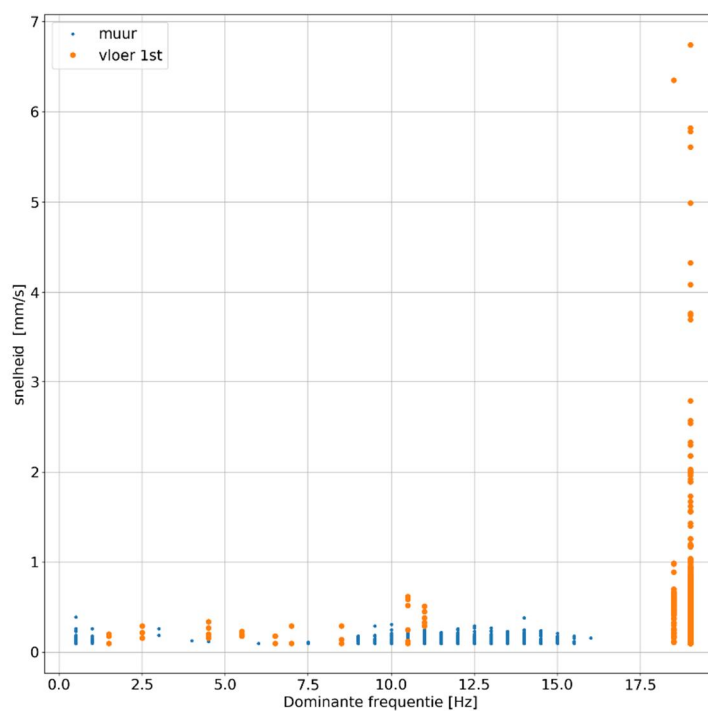
De invloed van de frequentie op de verhouding tussen de trillingen aan de muur en aan de vloeren wordt nader beoordeeld. Figuur 5.30 en Figuur 5.31 toont de relatie tussen de dominante frequentie en de trillingssnelheid voor beide vloeren en de muur. De dominante frequentie is door de meetapparatuur automatisch vastgesteld en opgeslagen. Indien resonantie optreedt, moeten in beide opnemers de dominante frequentie dicht bij de resonantiefrequentie liggen.

Het beeld voor beide vloeren verschilt wezenlijk. Bij de begane grond vloer (Figuur 5.30) vallen de dominante frequenties redelijk samen in de band van 10 Hz tot 15 Hz, bij de eerste verdiepingvloer (Figuur 5.31) treden grote trillingen op bij de frequentie 19 Hz. Voor de begane grond (Figuur 5.30) lijkt er geen grote versterking van de verticale trillingen op te treden. De trillingen aan de muur zijn in gemiddelde zin niet groter dan aan de vloer. Voor de vloer op de eerste verdieping (Figuur 5.31) lijkt er ook geen wezenlijke versterking op te treden. Wel trilt de vloer heel sterk bij 19 Hz. Aan de muur treden dan geen trillingen op boven het drempelniveau van 0,1 mm/s. Dit beeld past wel in de constatering dat de schepen specifieke frequenties genereren. De vloer moet dan wel een eigenfrequentie hebben die zeer lichtgedempt is, omdat de trillingen aan de muur zeer klein zijn en het schip moet net een belasting veroorzaken met dezelfde frequentie. Dit is dan een uitzonderlijke situatie.

Omdat er geen relatie tussen de trillingen op de muur en de grootste trillingen op de vloer (van de eerste verdieping) beschikbaar is, is een verdere analyse van de meetresultaten aan deze vloer niet zinvol.



Figuur 5.30 Relatie tussen frequentie en trillingssnelheid vloer begane grond



Figuur 5.31 Relatie tussen frequentie en trillingssnelheid vloer eerste verdieping

5.8.4 Conclusie

Tijdens deze meting is de rekenwaarde van de trillingsbelasting van trillingen op de muur met een externe oorzaak bepaald op 1,0 mm/s. De rekenwaarde voor de grenswaarde is 2,0 mm/s. De situatie voldoet aan de eis in de SBR-richtlijn deel A [7]. De kans op schade is verwaarloosbaar.

Door het grote aantal stoortrillingen is het niet mogelijk een uitspraak te doen over de hinder door de externe bronnen. Er treden regelmatig trillingen op die boven de streefwaarden uitkomen. Er is echter geen verband vastgesteld tussen de trillingen die aan de muur optreden en de trillingen die aan de vloer optreden.

Door de problematiek van de opnemers en de stoortrillingen op de vloeren is het niet goed mogelijk de representativiteit van de bemande meting te onderbouwen met deze meting. Wel is het duidelijk dat de trillingen aan de muur die de grenswaarde overschrijden hoogst waarschijnlijk geen externe oorzaak hebben. Ook lijkt er geen andere oorzaak van trillingen aanwezig te zijn, maar door de grote invloed van de stoortrillingen op de vloer is dit beeld niet heel duidelijk.

Door de opgetreden problemen geeft deze monitoring geen overtuigend beeld van het trillingsniveau gedurende een langere periode. Aanbevolen wordt deze monitoring te herhalen in een pand dat niet of nauwelijks wordt betreden. Daarbij wordt aanbevolen meer opnemers op de muur te plaatsen en minder op de vloer en tegelijkertijd informatie over de gebeurtenissen op straat en in het kanaal te verzamelen.

5.9 Aanvullende onbemande metingen gedurende drie weken

In drie panden worden gedurende drie weken in februari – maart 2020 trillingsmetingen uitgevoerd. In elk pand is gemeten op twee punten aan de voorgevel op het niveau van de begane grond, één punt aan de voorgevel nabij de dakgoot en één punt aan de achterzijde van het pand op het niveau van de begane grond. Tevens is er een video bewaking geweest, zodat kan worden nagegaan of een passage van een schip of een vrachtwagen de oorzaak van de waargenomen trillingen is geweest.

Deze paragraaf bevat het verslag van de globale beoordeling van de waarnemingen tot 8 maart 2020.

Bij deze voorlopige beoordeling wordt nagegaan wat de hoogste trillingen zijn. Als op dat moment in alle opnemers een hoge trilling wordt waargenomen is dit een trilling uit een externe bron. Als op dat moment een schip of een vrachtwagen wordt gezien, wordt aangenomen dat die passage de oorzaak van de trilling is. Als er geen schip of vrachtwagen zichtbaar is, wordt aangenomen dat er een andere externe bron actief is geweest.

In de definitieve interpretatie wordt expliciet nagegaan of het trillingsniveau voldoet aan de eisen die uit de SBR-richtlijn deel A volgen.

De volgende aannames zijn gedaan voor de grenswaarden:

- Alle panden vallen in categorie 2.
- De trillingen zijn herhaald kortdurend.
- De frequentie met de laagste karakteristieke waarde treedt op.
- De meting wordt opgevat als beperkte meting.
- De bouwkundige staat is gevoelig.

Als grenswaarden voor de directe schade gelden:

$$v_{kar} = 5 \text{ mm/s}, \gamma_t = 1,5, \gamma_v = 1,4, \gamma_s = 1,7$$

Dit geeft voor de toelaatbare maximaal gemeten trilling 1,4 mm/s.

Als grenswaarden voor de indirecte schade gelden:

$$v_{kar} = 10 \text{ mm/s}, \gamma_t = 1,6, \gamma_v = 1,4, \gamma_s = 1,7$$

Dit geeft voor de toelaatbare maximaal gemeten trilling 2,6 mm/s.

5.9.1 Algemene ervaring

Bij het inregelen bleek dat de passage van de schepen zeer kleine trillingen geeft. Praktisch gesproken zijn deze nauwelijks van de ruis te onderscheiden. Om de scheepspassages wel te bepalen moet continue worden gemeten, en daar is de gebruikte apparatuur niet voor geschikt. Dat heeft tot gevolg dat er weinig scheepspassages zichtbaar zullen zijn. Mocht een scheepspassage wel tot een hoge trilling leiden, dan wordt deze wel gemeten, omdat het trillingsniveau bepaalt of een trilling wordt bewaard. Als er geen trillingen tijdens scheepspassages worden gevonden betekent dit automatisch dat deze trillingen klein zijn en geen schade zullen veroorzaken.

De metingen aan de panden T1, T2 en T3 zijn verwerkt tot en met zondag 8 maart 2020.

5.9.2 Meetpand T1

Dit pand ligt nabij een brug en er is een verkeersplateau voor de brug aanwezig. Het betreft een prioriteitspand. De meting is gestart op 27 februari 2020.

Er blijken zelden trillingen van 1 mm/s of hoger op te treden. De hoogste waardes boven de 1,0 mm/s zijn geconstateerd:

- 28 februari om 14:21: 1,3 mm/s, uitsluitend zichtbaar in opnemer rechtsonder. Later zal worden geanalyseerd of deze het gevolg zijn van een passerende bestelbus.
- 29 februari 15:44: 1,2 mm/s, uitsluitend zichtbaar in de opnemer linksonder. Op dit moment heeft de camera geen beweging geconstateerd.

5.9.3 Meetpand T2

Dit pand ligt op 300 m afstand van de meest nabije brug. Er is geen wachtplaats in de nabijheid. Op wat grotere afstand is een verkeersdrempel aanwezig. Het betreft een prioriteitspand. De meting is gestart op 27 februari 2020.

Aan de voorzijde van het pand wordt de 1 mm/s nauwelijks overschreden. De overschrijdingen aan de voorzijde van het pand zijn:

- 8 maart 16:00: 1,8 mm/s, linksonder in y-richting.
- 8 maart 17:30: 1,7 mm/s, linksonder in y-richting.

Beide trillingen zijn slechts in één signaal zichtbaar en er is geen passage van zwaar verkeer zichtbaar. Dit zijn dan ook lokale trillingen. Aan de achterzijde van het pand zijn in de lage opnemer ook overschrijdingen van de 1 mm/s gezien, onder andere op 7 maart 17:30. Deze is echter in beide opnemers in de voorkant niet zichtbaar. Ook dit is een lokale trilling.

5.9.4 Meetpand T3

Dit pand ligt op 400 m vanaf de brug, ver van weg en verkeersdrempel. Het langskomende verkeer is ongeveer hetzelfde verkeer als bij Meetpand T2. Dit is geen prioriteitspand.

Vanwege een technisch probleem zijn de eerste resultaten niet beschikbaar.

5.9.5 Voorlopige conclusie aanvullende trillingsmetingen

De beschikbare resultaten bevestigen de eerder in hoofdstukken 5.5, 0 en 5.8 getrokken conclusie dat de trillingen door scheepspassages niet tot schade leiden. Verkeerstrillingen hebben tot nu toe de grenswaarden niet overschreden.

5.10 Trillingsmonitoring bij intrillen damwanden (2011-2012 en 2018-2019)

Tijdens het trillend installeren en verwijderen van damwandplanken ontstaan trillingen in de omgeving. Deze trillingen kunnen via verschillende mechanismes schade aan panden in de omgeving veroorzaken:

- Directe schade. Het trillingsniveau in het pand is zo hoog dat de (statische en dynamische) spanningen in het pand groter zijn dan de sterkte van het materiaal. In de SBR-richtlijn [7] wordt dit mechanisme schade aan de constructie genoemd.
- Indirecte schade. Het trillingsniveau in de grond wordt zo hoog dat er verzakkingen in de bodem ontstaan. Het pand dat op de bodem staat krijgt daardoor (statische) spanningen die groter zijn dan de sterkte van het materiaal. In de SBR-richtlijn [7] wordt dit mechanisme schade aan de fundering genoemd.

Indirecte schade kan op verschillende manieren ontstaan: de grond verdicht door een langdurige trilling waardoor een ongelijkmatige zetting in de funderingsgrondslag ontstaat, de grond rondom de damwandplank verdicht waardoor een zogenaamde zettingstrog ontstaat of de trilling is zo sterk dat de sterkte van de grond af en toe wegvalt.

In deze paragraaf worden twee benaderingswijze gebruikt om een idee te krijgen van de mogelijke bijdrage aan de schades. In eerste instantie wordt uitgegaan van de metingen die tijdens de uitvoering in 2011 en 2012 zijn gedaan. Deze benadering is uitgewerkt voor de prioriteitspanden. De rapportage van de werkzaamheden is summier, zodat de interpretatie lastig is. In 2018 en 2019 zijn vergelijkbare werkzaamheden uitgevoerd, die uitgebreider zijn gedocumenteerd. Op basis van deze resultaten wordt een model afgeleid ter vergelijking met de eerdere resultaten. Ten slotte wordt er een conclusie getrokken.

5.10.1 Beoordeling metingen tijdens uitvoering

Tijdens de aanleg van de passeerplaatsen in 2011 en 2012 is op een aantal plaatsen een nieuwe damwand geplaatst en de oude damwand verwijderd. Bij de uitvoering van deze werkzaamheden zijn door de aannemer veelal trillingsmetingen uitgevoerd. De verslaglegging van deze metingen aan de provincie is zeer beperkt uitgevoerd. In de meeste situaties is uitsluitend per dag aan gegeven wat het trillingsniveau in een opnemer is geweest, waarbij niet aangegeven is waar precies is gemeten. Ook is er geen dominante frequentie beschikbaar tijdens de overschrijding.

In het bestek is aangegeven dat er metingen worden uitgevoerd aan de panden met een afstand tot de damwand die kleiner is dan tweemaal de lengte van de damwand. De metingen worden gestart als en voortgezet zolang de afstand tussen de werkzaamheden en het pand minder dan vier maal de lengte van de damwand is.

5.10.1.1 Overzicht beschikbare metingen

Tabel 5.11 geeft een overzicht van de informatie over de metingen tijdens het aanpassen en/of verbeteren van de damwanden tijdens de uitbreiding in 2011 en 2012. Deze informatie is door de provincie beschikbaar gesteld. De nummering van deze panden is overgenomen uit de toenmalige nummering tijdens de uitvoering van de metingen en staat volledig los van de nummering van de panden in Tabel 1.2.

Tabel 5.11 Resultaten trillingsmetingen tijdens de uitvoering, de nummering van deze panden is overgenomen uit de toenmalige nummering tijdens de uitvoering van de metingen en staat volledig los van de nummering van de panden in Tabel 1.2.

Locatie en pand	Meetperiode	Hoogste waarde ⁽⁰⁾ [mm/s]
BV 2, pand onbekend, activiteit onbekend	5-6 mrt 2012	3,2 (v_{peak})
WP 3, pand no 11, "ankers"	21 nov 2011	0,9 (v_{top})
WP 3, pand no 12, "ankers"	22 nov 2011	0,8 (v_{top})
WP 4, pand 53, "ankers" ⁽²⁾	17 nov 2011	3,7 (v_{top})
WP 4, pand 51, "ankers"	18 nov 2011	2,7 (v_{top})
WP 4, pand onbekend, "damwand"	26 nov 2011	0,7 (v_{peak})
WP 4, pand 51, "damwand"	27 nov 2011	0,7 (v_{peak})
WP 4, pand 53, "damwand"	28 nov 2011	1,0 (v_{peak})
WP 4, pand 57, "damwand"	29 nov 2011	0,5 (v_{peak})
WP 4, pand 59, "damwand"	30 nov 2011	1,1 (v_{peak})
WP 4, pand onbekend, "heien"	24 nov 2011	0,6 ⁽¹⁾ (v_{top})
WP 4, pand "BV t.o. WP4", activiteit onbekend	17-18 okt 2011	2,0 (v_{peak})
WP 4 BV, pand 78, 76, 74, "ankers"	9 dec 2011	1,0 (v_{top})
WP 4 BV, pand 74, "ankers" ⁽⁵⁾	12 dec 2011	3,4 (v_{top})
WP 4 BV, pand onbekend, activiteit onbekend	18-19 okt 2011	2,0 (v_{peak})
WP 5 BV ⁽³⁾ , pand no. 69, "damwand"	17-18 okt 2011	2,0 (v_{peak})
WP 4 BV, pand 78, "damwand"	27 okt 2011	1,8 (v_{peak})
WP 4 BV, pand 80, "damwand"	28 okt 2011	1,2 (v_{peak})
WP 5, pand no 94, "ankers"	6 dec 2011	1,4 (v_{top})
WP 5, pand no 94, "ankers"	7 dec 2011	0,8 ⁽⁴⁾ (v_{top})
WP 5, fase B, pand onbekend, activiteit "damwand"	26 sep 2011	0,7 (v_{peak})
WP 5, fase B, pand 92, activiteit "damwand"	27 sep 2011	0,7 (v_{peak})
WP 5, fase B, pand 94, activiteit "damwand"	28 sep 2011	1,0 (v_{peak})
WP 5, fase B, pand 97, activiteit "damwand"	29 sep 2011	0,5 (v_{peak})
WP 5, fase B, pand 99, activiteit "damwand"	20 sep 2011	1,1 (v_{peak})
WP 5, fase B, pand onbekend, activiteit "damwand"	3 okt 2011	0,9 (v_{peak})
WP 7, pand 67, "ankers"	19 jan 2012	2,1 (V)
WP 7, pand 79, "ankers"	19 jan 2012	1,6 (V)
WP 7, pand 72, "ankers"	20 jan 2012	0,8 (V)
onbekend, onbekend, onbekend	12 dec 2011	3,4 (v_{top})
onbekend, onbekend, onbekend	21 nov 2011	0,9 (v_{top})
onbekend, onbekend, onbekend	22 nov 2011	0,8 (v_{top})

WP is de afkorting voor wachtplaats, BV is de afkorting voor Boordvoorziening

⁽⁰⁾ Tussen haakjes het symbool op de verticale as

⁽¹⁾ Trilling van 2,3 mm/s aan einde meetinterval is geïnterpreteerd als het verwijderen van de opnemer voordat de apparatuur is uitgeschakeld

⁽²⁾ Panden die in één cel staan, zijn vermeld in één bestand

⁽³⁾ Bestandsnaam suggereert wachtplaats 4, maar in het bestand staat wachtplaats 5. Dit is waarschijnlijk dezelfde meting als de meting op 18-19 oktober WP 4, B.V., pand onbekend

⁽⁴⁾ Hoge trilling aan begin meetinterval is geïnterpreteerd als het plaatsen van de opnemer nadat de apparatuur is ingeschakeld

⁽⁵⁾ Vanaf dit punt is een meetresultaat in delen opgesplitst als duidelijk is aan welke panden is gemeten

In de rechterkolom wordt aangegeven of in het bestand sprake is van v_{top} of v_{peak} . In de verdere behandeling is verondersteld dat hiermee dezelfde grootte wordt bedoeld en wel de grootste gemeten snelheid.

Voor een interpretatie volgens de SBR-richtlijn deel A [7] wordt aangenomen dat de tekst "damwand" refereert aan het trillend installeren van de damwand en anker refereert aan het boren van het klapanker. Het installeren van de damwanden en boren van de ankers is een continue trilling, de partiële factor voor het type trilling γ_t is dan 2,5. Er is geen sprake van een monumentale status of slechte bouwkundige staat, $\gamma_s = 1,0$. Uitgaande van een laagfrequent blok met 25 Hz is de karakteristieke waarde van de grenswaarde 8,75 mm/s. Er is verondersteld dat de frequentie van het blok de dominante frequentie in de meting is. De rekenwaarde voor de sterkte is dan 3,5 mm/s. Er is één meetsignaal en dus sprake van een indicatieve meting $\gamma_v = 1,6$. De rekenwaarde voor de belasting wordt 1,6 maal de hoogste waarde uit Tabel 5.11. Dat geeft 5,9 mm/s. Omgekeerd kan worden geredeneerd dat de in het veld gemeten snelheid v_{top} lager moet zijn dan de grenswaarde gedeeld door de partiële factor, dus $3,5/1,6 = 2,2$ mm/s. In Tabel 5.11 is zichtbaar dat deze waarde (voor schade aan de constructie) tijdens de gerapporteerde werkzaamheden 5 maal is overschreden.

Op basis van deze gegevens en aannames kan worden gesteld dat op een aantal plaatsen de grenswaarden van de SBR-richtlijn deel A [7] zijn overschreden. Het betreft 5 van de 32 meetresultaten, dat is 16%. De belangrijkste aanname betreft de dat de partiële factor voor het type trilling ($\gamma_t = 2,5$) nog niet in de gepresenteerde V_{top} of V_{peak} waarden is verdisconteerd. Het percentage is zeer globaal, omdat de informatie niet altijd eenduidig is en het niet zo veel panden betreft.

De gemeten snelheden moeten ook worden gecontroleerd aan de eisen voor schade aan de fundering. Het installeren van de damwanden en boren van de ankers is een continue trilling, de partiële factor voor het type trilling γ_t is dan 2,0. Er is geen sprake van een monumentale status of slechte bouwkundige staat, $\gamma_s = 1,0$. De rekenwaarde voor de grenswaarde is dan $V_r = 5,0$ mm/s. Voor een indicatieve meting is de rekenwaarde voor de trillingssnelheid $V_d = 3,7 \cdot 1,6 = 5,9$. Dit is boven de rekenwaarde voor de grenswaarde en voldoet niet. Uitgaande van een harmonische trilling met 25 Hz is de hoogste versnelling $0,58 \text{ m/s}^2$. Dit voldoet ook aan de eis van 1 m/s^2 . Deze conclusie geldt ook voor een trilling met een frequentie tot 40 Hz. Geconcludeerd wordt dat de situatie ook niet voldoet aan de snelheidseis voor schade aan de fundering.

5.10.1.2 Specifieke beoordeling prioriteitspanden

De gegevens in Tabel 5.11 worden vergeleken met de werkzaamheden nabij prioriteitspanden in zoals beschreven in Tabel 1.2. Hierbij wordt opgemerkt dat een wachtplaats de situatie is daar waar schepen mogen aanmeren en een boordvoorziening ook vaak nieuwe damwanden en ankers betreft maar schepen niet mogen aanmeren..

De metingen worden getoetst aan de eis dat de gemeten snelheid v_{top} lager moet zijn dan $3,5/1,6 = 2,2$ mm/s. Als dit het geval is dan is de rekenwaarde voor de trillingsbelasting onder de rekenwaarde voor de toelaatbare trilling en voldoet de situatie aan de SBR-richtlijn A.

De volgende waarnemingen zijn gedaan.

Het prioriteitspand ligt ongeveer 10 m van de damwand. Op basis van de bestekstekening voor boordvoorziening 2 zijn de ankers aangebracht direct voor een negental prioriteitspanden. Er is één trillingsmeting beschikbaar voor boordvoorziening 2, waar gedurende twee dagen is gemeten. Dit lijkt een redelijke termijn voor het aanbrengen van de benodigde 36 ankers. Het is uit de beschikbare meetgegevens niet duidelijk aan welk pand deze overschrijding heeft plaatsgevonden. Bij vermoedelijk 2 panden is de grenswaarde van 2,2 mm/s overschreden.

Bij wachtplaats 4 zijn aan de oostzijde over een lengte van 160 m nieuwe damwandplanken geïnstalleerd en ankers aangebracht. Bij de boordvoorziening aan de westzijde zijn over een lengte van 160 m nieuwe damwandplanken geïnstalleerd en ankers aangebracht. Er is tijdens het installeren van de damwandplanken een trillingsmeting uitgevoerd op de panden aan de zijde waar wordt gewerkt.

Voor de wachtplaats worden de panden 51, 53, 57 en 59 in het resultaat genoemd. Opgemerkt wordt dat de panden 49 tot en met 60 direct achter de damwand staan, waarbij de panden 55/56 en 60 de kortste afstand tot de damwand hebben. Het is niet af te leiden dat op alle panden is gemeten tijdens de werkzaamheden. De gemeten trillingen zijn beperkt tot 1 mm/s, wat ruim onder de grenswaarde is.

Tijdens het aanbrengen van de ankers is het trillingsniveau bij zeker twee panden boven de grenswaarde gekomen. Hierbij wordt opgemerkt dat bij deze wachtplaats en boordvoorziening damwanden van 6 m respectievelijk 7 m zijn geplaatst, met ankers van 15 m onder een hoek van 25°. Uitgaande van een meting op een pand als dit op (minder dan) tweemaal de lengte van de damwand staat, betekent dit dat alleen is gemeten op panden die minder dan 12 m (14 m) uit de damwand staan. Een anker van 15 m onder 25° eindigt op een horizontale afstand van 13,6 m vanaf de damwand. Dat kan dus vlak bij een pand zijn, waaraan geen meting is verricht. Het klapanker zelf bevindt zich overigens wel op ongeveer 6 m onder de gording, dat is de diepte als het maaiveld horizontaal loopt.

De prioriteitspanden in de omgeving van wachtplaats 4 staan niet direct achter de damwand die is geplaatst. De kortste afstand tussen de werkzaamheden en de damwand is 28 m. Dit is de hemelsbrede afstand tussen de damwand en het pand, de afstand tussen het laatste klapanker en het pand is iets kleiner ongeveer 27 m. Gezien de diepte van de klapankers is het redelijk om te veronderstellen dat de gemeten maximale trilling een maat is voor de trillingssterkte op de referentieafstand van 5 m. Bij een afname die omgekeerd evenredig met de afstand is, betekent dit dat op 25 m afstand een waarde van $1/\sqrt{(25/5)} = 0,45$ van de gemeten waarde wordt gevonden. Hierbij wordt de materiaaldemping verwaarloosd. Het in rekening brengen van de materiaaldemping zal tot een lagere leiden. De gemeten maximale waarde is dan afgenomen van 3,7 mm/s tot 1,7 mm/s. Dit is onder de toelaatbare waarde, dus het is niet te verwachten dat de trillingen door het plaatsen van de damwanden of de ankers tot schade aan de prioriteitspanden rondom deze wachtplaats heeft geleid.

Voor de prioriteitspanden in de omgeving van wachtplaats 5 geldt in beginsel hetzelfde als voor de panden rondom wachtplaats 4. Er zijn hierbij alleen trillingsmetingen beschikbaar tijdens het inbrengen van de damwanden, maar geen trillingsmetingen tijdens het plaatsen van de ankers.

Op basis van de prioriteitspanden in Tabel 1.2 is een tabel gemaakt van deze panden en het gemeten trillingsniveau in de panden in de omgeving van de werkzaamheden. Dit is alleen gedaan voor de panden die in Tabel 1.2 een wachtplaats of boordvoorziening in de nabijheid hebben. Voor elk pand is nagegaan of er voor het betreffende pand een trillingsmeting is uitgevoerd. Indien dat niet het geval is, is een schatting gemaakt van het verwachte trillingsniveau uit de meting en de afstand tussen de damwand en de betreffende panden. Voor het afstandsverband is uitgegaan dat de trillingssnelheid afneemt met de wortel van de afstand. De gebruikte formule 4-4 komt overeen met de aanpak in het CUR-handboek [3]. In tegenstelling tot de aanpak in het CUR handboek, is nu wel een waarde aangenomen voor de materiaaldemping, omdat bekend is dat deze op grotere afstand een steeds belangrijkere rol speelt. Verderop in dit rapport zal overigens blijken dat de demping op deze afstand nog geen rol van betekenis speelt.

$$v(r_{pand}) = R_{golf}^{\left(\frac{r_{meting} - r_{pand}}{\lambda_{golf}}\right)} \sqrt{\frac{r_{meting}}{r_{pand}}} v(r_{meting})$$

Vergelijking 5-1

Hierbij moet worden opgemerkt dat voor het intrillen van het anker de afstand tussen het pand en de trillingsbron niet eenduidig vastgesteld is. De gekozen waarde is de grootste afstand, want de trillingen zullen lang de hele lengte van het anker en de punt worden overgebracht. Omdat deze afstand in de teller van de extrapolatie formule staat, wordt het trillingsniveau op grotere afstand mogelijk iets overschat.

Indien er een meting aan de panden achter de damwand beschikbaar is, is de gemeten waarde genoemd (als “meting”). Hierbij is het onzeker of de maatgevende meting daadwerkelijk aan het betreffende pand is uitgevoerd. Voor de overige panden is met bovenstaande vergelijking een extrapolatie van het maximale trillingsniveau uitgevoerd. In de tabel wordt de berekende waarde genoemd, als “extrapolatie”. Hierbij is voor de golflengte 4 m gekozen en voor de reductiefactor R_{golf} 0,99 gekozen. Dit betekent 1% afname per golflengte. Voor zandgrond is dat een redelijke waarde. Er is getoetst op een maximale toelaatbare waarde van 2,2 mm/s, zie paragraaf 5.10.1.1.

Een aantal panden staat tussen twee werkgebieden in. Daarbij is het niet a priori duidelijk vanaf welk werkgebied het model de grootste trilling voor het pand bepaalt. In de beoordeling is de modelmatig grootste trilling opgenomen.

Uit de beoordeling blijkt dat voor 5 van de 11 prioriteitspanden geen overschrijding wordt verwacht. Voor 4 van de 11 panden is een overschrijding mogelijk. Voor 2 van de 11 panden is er een overschrijding.

5.10.1.3 Opmerkingen n.a.v. de analyses

Het is opvallend dat het plaatsen van de ankers hogere trillingen geeft dan het plaatsen van de damwanden. Dit heeft mogelijk te maken met de bodemopbouw. Bij de hier beschouwde situatie wordt het anker ook in het zand getrild, en dit wijkt af van de situatie van een damwand in een bodem met een dikke slappe bovenlaag op een zandlaag, waar de ankers in de slappe laag komen. Het gebruikte criterium voor het wel of niet uitvoeren van een trillingsmeting op basis van “tweemaal de lengte van de damwand” is onvoldoende als de ankers worden ingetrild. Het lijkt beter om deze afstand te vermeerderen met de (horizontale) lengte van de ankers.

Het is niet aantoonbaar gemaakt dat op alle panden die daarvoor in aanmerking komen ook daadwerkelijk is gemeten tijdens de uitvoering van de werkzaamheden die trillingen veroorzaken. Het lijkt er op dat er één opnemer aanwezig is geweest die de hele dag op een daarvoor in aanmerking komend heeft gestaan. Er is geen verslag van het verloop van de werkzaamheden gedurende de dag, en er zijn daardoor mogelijk geen metingen verricht aan panden waaraan wel moest worden gemeten. De rapportages zijn zeer kort en mogelijk niet compleet, de provincie heeft als opdrachtgever niet aangedrongen op een betere en completere rapportage.

Er zijn geen opnames van de panden gedaan voorafgaand aan de constructiewerkzaamheden bij de wachtplaatsen en boordvoorzieningen.

5.10.1.4 Berekening trillingssterkte tijdens het intrillen van een damwand

In het rapport [5] heeft Geo2 engineering (in 2019) een prognose van het trillingsniveau gemaakt voor de installatie van de nieuwe damwanden langs enkele delen van het kanaal. Omdat de uitgevoerde constructie in 2011 vergelijkbaar is met de voorziene constructie in 2019, kunnen deze berekeningen worden gebruikt om een indruk te krijgen van de modelmatig te verwachten trillingsniveaus.

Rapport [5] volgt de aanpak van het CUR rapport “Damwanden” [3]. De volgende aannames zijn gedaan:

- Trilblok met slagkracht 1044 kN en frequentie 38 Hz.
- Grondprofiel Den Haag (als toelichting: het CUR rapport geeft de modelinvoer voor elf type bodemprofielen. Het bodemprofiel dat de beste overeenkomst heeft de situatie langs het kanaal heeft de titel “Den Haag”. Het betreft een duidelijk zandige bodem).
- Geen materiaal damping in de berekening ($\alpha = 0$).
- Veiligheidscoëfficiënt voor het type trilling is 2,5.

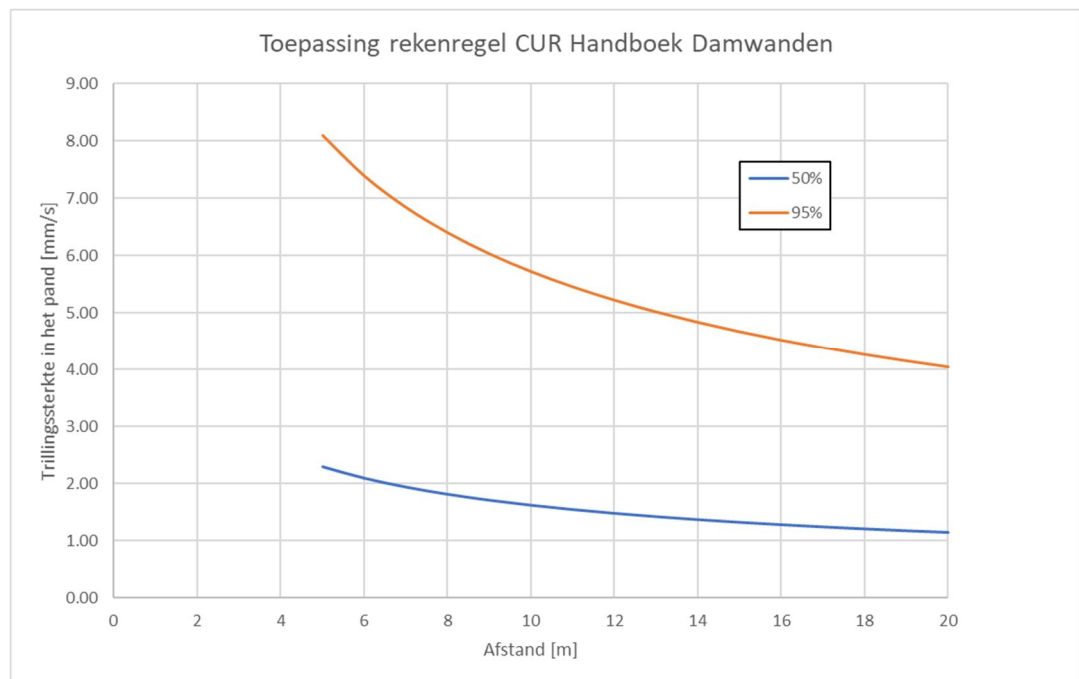
De rekenwaarde voor de trillingsterkte (weerstand tegen trilling) is bij 38 Hz $12,0/2,5 = 4,8$ mm/s

De trillingssterkte op het pand op afstand r van de bron wordt berekend met de formule:

$$v_{pand}(r) = 0.7 * \frac{\sqrt{5}}{\sqrt{r}} \left[u_0 + C_r * (F_{slag} - 350) \right]$$

Vergelijking 5-2

Waarbij voor een 50% waarde geldt $u_0 = 1,9$ en $C_r = 0,002$ (de term tussen de vierkante haken wordt dan 3,28 mm/s) en voor een 95% waarde geldt $u_0 = 6,7$ en $C_r = 0,007$ (de term tussen de vierkante haken wordt dan 11,56 mm/s). Figuur 5.32 geeft de resultaten van deze functie.



Figuur 5.32 Trillingsbelasting op een pand volgens de rekenregel in het CUR handboek damwanden

De panden staan binnen tweemaal de lengte van de damwanden, die volgens de bestekken maximaal 10 m zijn. De grootste afstand is dus 20 m. Op basis van de kaarten is de afstand tussen de damwand en een pand zelden onder de 10 m, zodat de gemiddelde trillingssterkte wordt verwacht tussen de 1,1 mm/s en de 1,7 mm/s. De 95% karakteristieke bovengrens is tussen de 6 mm/s en 4 mm/s. Deze waarde zal naar verwachting in 1 op de 20 gevallen worden overschreden. Deze gemiddelde waarde komt redelijk overeen met de gemeten waarden in Tabel 5.11 met de activiteit “damwand”.

5.10.1.5 Interpretatie en generalisatie

Voor een beoordeling volgens de SBR richtlijn deel A [7], moet de gemeten waarde worden vermenigvuldigd met de partiële factor voor het type meting. Voor een indicatieve meting is dit 1,6. De rekenwaarde voor de trillingsbelasting wordt dus 1,8 mm/s tot 2,7 mm/s en voldoet in gemiddelde zin. De rekenwaarde voor de 95% karakteristieke grens voor de trillingsbelasting ligt tussen de 6,4 en de 10 mm/s en dus ruim boven de rekenwaarde voor de trillingssterkte. Dat betekent dat de verwachting is dat in meer dan 1 op de 20 gevallen (bijvoorbeeld in 1 op de 10 gevallen) de situatie niet aan de eisen van de SBR zal voldoen. Hierbij wordt de kanttekening gemaakt dat dit niet betekent dat er schade ontstaat, maar dat de kans op schade groter is dan wat in het algemeen acceptabel is. De geaccepteerde kans op schade bij een trilling gelijk aan de grenswaarde is ongeveer 1%, het betreft dan meestal kleinere schades die goed te herstellen zijn. Dit percentage neemt wel sterk toe naar mate de grenswaarde wordt overschreden.

Het is opvallend dat in Tabel 5.11 de trillingen met activiteit ankers relatief groot zijn. Mogelijk ontstaat dit effect doordat de afstand tussen de boorkop van de ankers en de panden aanzienlijk kleiner is dan de afstand tussen de damwand en de panden. Dit is dan ook een verklaring voor de wat grotere spreiding voor deze trillingen die Tabel 5.11 suggereert: De boorkop is een relatief lokale bron die geen grote trillingen geeft. Als de boorkop vlakbij de opnemer is, is dit duidelijk merkbaar. Maar vlakbij de bron nemen de trillingen heel snel af, meestal met $1/r$ of $1/r^2$ (r : afstand tussen de boorkop en de opnemer). Bij een volgend anker is de afstand al groter en de trilling een kleiner. Afstand is daarmee een belangrijke parameter. Voor dit fenomeen is momenteel geen algemene rekenregel voor beschikbaar.

5.10.2 Verwerking metingen 2018 en 2019

In 2018 en 2019 zijn vergelijkbare werkzaamheden uitgevoerd. Op basis van deze resultaten wordt een empirisch model uitgewerkt. Meer achtergrond van deze metingen is te vinden in Bijlage L.

In 2019 zijn op drie locaties langs het kanaal de damwanden vervangen. Deze werkzaamheden zijn vergelijkbaar met de werkzaamheden die in 2011-2012 zijn uitgevoerd [10]. Tijdens deze werkzaamheden in 2019 zijn de trillingsniveaus bemand gemonitord en is zijn de overschrijdingen van de signaal en grenswaarden expliciet beoordeeld tijdens het werk en in een spreadsheet vastgelegd. Deze gegevens geven wel de mogelijkheid om een generiek inzicht in het trillingsniveau tijdens de werkzaamheden te krijgen. Daarnaast is een meting uit 2018 bij werkzaamheden rond de brug in de Spoorstraat in Daarlerveen beschouwd [11].

Er zijn in twee periodes werkzaamheden uitgevoerd: in juni bij de Daarlerveenseweg in Vriezenveen en in augustus-oktober langs de Brugstraat in Daarlerveen en de Hoofdstraat in Vroomshoop. Van deze werkzaamheden is van elke overschrijding van de signaalwaarde en de grenswaarde een aantekening en beoordeling gemaakt. De overschrijdingen die een oorzakelijk verband hebben met het proces van trillend plaatsen van de damwand planken zijn uitgewerkt. De overschrijdingen die buiten het interval van de werkzaamheden vielen en de overschrijdingen die (op basis van de aantekeningen in de spreadsheet) een aantoonbaar andere oorzaak hadden (meestal aanstoten van de opnemer, soms verkeer) zijn verwijderd. Ook eenmalige aanstotingen die wel samenhangen met de werkzaamheden maar aanleiding geven tot kortdurende trillingen zijn verwijderd. Dit type trillingen moet beoordeeld worden aan 2 tot 2.5 maal hogere grenswaarden omdat deze een kleinere schadekans hebben. De geregistreerde trillingen die boven de grenswaarden voor kortdurende trillingen zijn geweest, zijn gecontroleerd door een medewerker van de aannemer. Deze bleken volgens de observatie in de spreadsheet niet samen te hangen met werkzaamheden, maar met lokale bronnen bij de opnemer..

De metingen uit de periode augustus-oktober 2019 zijn gebruikt om het beoordelingsmodel te bouwen. Het betreft hier 94 panden. Opvallend hierbij is dat tot op grote afstand enkele

meetwaarden worden gevonden, die zodanig zijn, dat op die afstand minimaal de signaal waarde is overschreden.

Op basis van deze waarnemingen is het niet mogelijk een afstandsafhankelijkheid te bepalen, omdat de werkzaamheden zijn afgebroken bij het overschrijden van de signaal- of grenswaarde. Dit leidt tot een foutieve schatting van de afname van de trillingssnelheid met de afstand, zoals ook in Figuur 5.33 zichtbaar is. Daarom is gekozen voor de afstandsafhankelijkheid in het CUR prognose model [3] te gebruiken. De amplitude neemt daarin af met de wortel van de afstand. Deze relatie is op fysische gronden verdedigbaar, maar onderschat de afstandsafname omdat op grote afstand de materiaaldemping gaat overheersen.

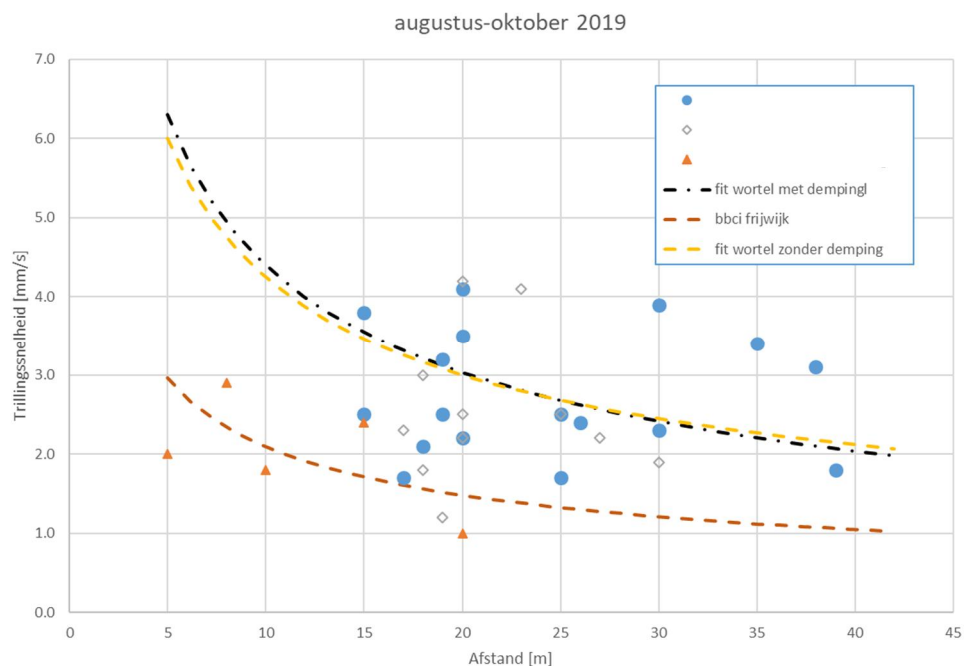
Vervolgens is (ook weer in lijn met de uitwerking van het CUR model) de 95% bovengrens bepaald. De 95% bovengrens is in dit geval de trillingssterkte die in 95% van de gevallen niet wordt overschreden en dus in 5% van de gevallen wel wordt overschreden. Dit heeft geleid tot de formule

$$v(r) = v(r_0) \sqrt{\frac{r_0}{r}}$$

Waarin:

- v de trillingssnelheid [mm/s].
- r de kortste afstand tussen het pand en de installeren damwand [m].
- r_0 de referentie afstand [m].
- $v(r_0)$ de trillingssnelheid op de referentie afstand [mm/s].

De referentie afstand is gekozen als 5 m, in overeenstemming met het CUR handboek Damwand-constructies [3]. Voor de 95% bovengrens moet worden gekozen $v(r_0) = 6$ mm/s.



Figuur 5.33 Resultaten van de metingen, de modellering die bbci Frijwijk voor de prognose heeft gebruikt en het empirische model voor de 95% bovengrens (gele en zwarte bovenste lijnen)

Figuur 5.33 toont de resultaten van de analyse. Het is belangrijk dat deze figuur alleen de geconstateerde overschrijdingen van de grenswaarden toont. Om deze data te kunnen

interpreteren is gebruikgemaakt van het rapport van Bbci Frijwijk [10]. In dit rapport is vooraf de situatie geïnventariseerd en voor alle panden een prognose uitgevoerd van het te verwachten trillingsniveau tijdens de werkzaamheden in 2018-2019. De prognose lijn van Bbci Frijwijk is een best guess lijn, die naar verwachting door de helft van de panden zal worden overschreden. Deze lijn is in de figuur ingetekend. Eén specifiek pand is blijkbaar iets boven het gemiddelde. Tien datapunten liggen boven de afgeleide grenslijn. Dit betreft 6 panden, omdat er meer metingen per pand beschikbaar zijn. Volgens het rapport van Bbci Frijwijk staan er 97 panden in het gebied. Aangenomen is dat bij de beoordeling alle overschrijdingen in deze 97 panden zijn gevonden. Dit is alleen zeker als aan alle panden is gemeten. Onder deze aanname is voor 7% van het aantal panden deze waarde overschreden, zodat gesteld mag worden dat deze lijn een redelijke afspiegeling is van de 95% bovengrens. Ten slotte toont de figuur dat de invloed van materiaal-demping (bij een demping van 1% per golflengte van 4 m) op dit model verwaarloosbaar is.

De meting uit 2018 en juni 2019 zijn wel bekeken en geven geen aanleiding om aan dit model te twifelen. Deze metingen geven wel aan dat het uitermate lastig is om een scherper prognose model te maken:

- Bij de meting in juni 2019 traden de grootste trillingen op bij de werkzaamheden op 30 m afstand van het pand, terwijl de kortste afstand 20 m was. Uit het logboek bleek dat er hier sprake was van een wat grotere grondweerstand, waardoor de installatie lang duurde en de plank herhaaldelijk moest worden opgehaald (omhoog getrild).
- Bij de meting in 2018 was het trillingsniveau weliswaar in lijn met het model, maar is wel aan relatief veel panden een overschrijding geconstateerd. De werkzaamheden zijn aangepast door bij te spuiten bij de punt van de plank in de harde laag.

Het CUR Handboek suggereert een factor van ruim 3 tussen de 50% grens en de 95% bovengrens, zie ook Figuur 5.33. In deze studie wordt een lagere factor (orde 2) gevonden. Het verschil lijkt vooral te komen doordat de 50% waarde uit het CUR handboek te laag is, wat ook blijkt uit het feit dat de empirische curve die Bbci Frijwijk hanteert een factor 1,5 hoger ligt.

Uitgaande van een grenswaarde voor een pand van 2 mm/s volgt voor de 95% karakteristieke bovengrens dat deze op een afstand van 45 m ligt, dat wil zeggen dat de kans dat de grenswaarde wordt overschreden, op grotere afstand dan 45 m kleiner is dan 5% . Met andere woorden: Er moet rekening worden gehouden dat binnen een (kortste) afstand tot de damwand van 45 m de grenswaarde kan worden overschreden. Voor panden die op basis van de SBR-richtlijn A [7] een andere grenswaarde krijgen toegekend, zal een andere afstand worden gevonden.

Het aspect schade aan de fundering moet formeel ook worden beoordeeld. Hiervoor gelden een snelheids criterium en een versnellings criterium. Het snelheids criterium leidt in dit geval tot een hogere grenswaarde en is dan ook niet maatgevend. Het versnellings criterium geeft aan dat de versnelling moet worden getoetst aan de eis dat deze onder de 1 m/s^2 blijft. Om een idee te krijgen van de te verwachten versnelling wordt uitgegaan van een harmonische belasting. De gemeten frequenties liggen in de range van 26-40 Hz, zoals bij de gangbare trilblokken kan worden verwacht. Uitgaande van het toetsniveau voor de trillingssnelheid van 2 mm/s geeft dit een versnelling van $2\pi \cdot 2 [\text{mm/s}] \cdot 40 [\text{Hz}] \cdot 10^{-3} [\text{m/mm}] = 0,5 \text{ m/s}^2$. Dit is ruim onder de eis van 1 m/s^2 , zodat niet verwacht wordt dat dit criterium maatgevend is [7].

5.10.3 Beoordeling prioriteitspanden

In paragraaf 3.3 zijn 6 panden geïdentificeerd met schade die mogelijk door trillingen is veroorzaakt. Op basis van de analyses in paragraaf 5.10.2 is de kans dat de panden verder dan 45 m afstand schade hebben gekregen kleiner dan 1%.

Er resteren dan drie prioriteitspanden uit de pandopnamen met trillingen uit damwandinstallatie als mogelijke oorzaak van de schade:

- Een eerste prioriteitspand op 29 m afstand van de boordvoorziening, volgens de beoordeling in paragraaf 5.10.1.2 overschrijding.
- Een tweede prioriteitspand op 38 m afstand van de boordvoorziening, volgens de beoordeling in paragraaf 5.10.1.2 geen uitspraak mogelijk voor de boordvoorziening.
- Een derde prioriteitspand op 28 m afstand van de boordvoorziening, volgens de beoordeling in paragraaf 5.10.1.2 geen uitspraak mogelijk voor de boordvoorziening.

Er is geen aanwijzing dat er tijdens de werkzaamheden aan de damwanden bij de wachtplaatsen grote problemen met de installatie zijn geweest. Het inbrengen van de vervangende damwanden in 2018-2019 geeft aan dat het goed mogelijk is zonder grote problemen de damwanden in te trillen.

Op basis van de extrapolaties van de metingen in 2011-2012 kan worden gesteld dat bij het eerste prioriteitspand de verwachting is dat grenswaarde uit de richtlijn is overschreden. De gangbare praktijk is dat voor- en na-opnames van het pand moeten uitwijzen welke schade tijdens de werkzaamheden is ontstaan. Deze schade is dan verondersteld te zijn ontstaan door de trillingen. Van dit prioriteitspand zijn geen vooropnames beschikbaar. De conclusie dat de trillingen uit damwandinstallatie de mogelijke oorzaak van de schade zijn volgt uit de pandopname achteraf, de geëxtrapoleerde trillingssterkte en de ligging binnen 45 m van de boordvoorziening.

Van het tweede prioriteitspand vermeldt het rapport over de pandopname dat in de Google Streetview uit 2009 grote scheuren niet zichtbaar waren. Ook stelt het rapport dat de voorgevel vanwege de grote opening "gevoelig" is voor trillingen. De conclusie dat de trillingen uit damwandinstallatie de mogelijke oorzaak van de schade zijn volgt voor dit pand uit de vooropname en de pandopname achteraf, ondersteund door de ligging binnen 45 m van de boordvoorziening.

Voor het derde prioriteitspand is geen vooropname beschikbaar. De conclusie dat de trillingen uit damwandinstallatie de mogelijke oorzaak van de schade zijn volgt voor dit pand uit de pandopname achteraf, ondersteund door de ligging binnen 45 m van de boordvoorziening.

Voor de overige prioriteitspanden met schade die mogelijk door trillingen is veroorzaakt wijzen de analyses uit dat de schade waarschijnlijk niet is gerelateerd aan trillingen door installatie van de damwanden.

5.10.4 Conclusie

De gemeten trillingen tijdens het installeren van de damwanden en ankers overschrijden bij meerdere panden de grenswaarden voor schade aan gebouwen volgens SBR-richtlijn A.

De metingen zijn niet goed gerapporteerd en niet compleet.

Als de trillingen ten gevolge van het installeren van de damwanden en ankers met het CUR-model worden geprognostiseerd dan zijn deze gemiddeld onder de grenswaarden van de SBR-richtlijn deel A, maar de gebruikelijk 95% waarde overschrijdt de grenswaarde eveneens.

Op basis van vergelijkbare werkzaamheden in 2018 en 2019 is een empirische curve voor de 95% bovengrens afgeleid. Deze geeft aan dat de kans dat de grenswaarde volgens SBR-richtlijn A wordt overschreden pas rond de 45 m vanaf de damwand onder de 95% daalt. Hierbij moet worden aangetekend dat bij overschrijden van de grenswaarde de kans op schade geschat wordt

op 1%. Voor panden binnen deze 45 m lijn is de kans op overschrijding groter. Op ongeveer 11 m afstand is de kans op overschrijding 50%, zie Figuur 5.33.

Voor dit gebiedsbrede onderzoek is het interessant om te weten welke schadekans is opgetreden door de werkzaamheden. Om een eerste indruk van de schade kans te krijgen is op basis van de resultaten in deze paragraaf een indicatieve probabilistische berekening gemaakt. De trillingsbelasting is als stochast ingevoerd waarbij de gemiddelde trillingssterkte afneemt met de afstand volgens bovenstaande model. De grenswaardes voor zowel directe schade als indirecte schade volgens de SBR-richtlijn deel A is toegepast. De schadekans neemt toe met de mate van overschrijden van de grenswaarde en de weerstand tegen directe schade en indirecte schade is gecorreleerd. Er is een Monte Carlo simulatie uitgevoerd over 500 000 realisaties, waarbij per realisatie is bepaald of er schade optreedt.

Dit model geeft dat op 10 m afstand van de damwand de schadekans orde 3% is, op 20 m ongeveer 1% en op 45 m ongeveer 0.5%. Deze waardes zijn zeer indicatief, maar onder bouwen wel dat nabij de damwand een grotere schadekans is en verder weg een kleinere schadekans. Een volledige berekening van de schadekans als functie van de afstand valt buiten het kader van dit rapport.

De analyse van de metingen geeft aan dat de kans op schade aan panden door het installeren van de damwanden en ankers bij de meest nabije panden orde 3% is, en binnen een straal van 45 m van de werkzaamheden afneemt tot 0,5%. De SBR-richtlijn stelt dat de grenswaarde hoort bij een kans op schade van 1% en dat deze kans maatschappelijk acceptabel is. Deze kans wordt op ongeveer 20 m vanaf de damwand overschreden. Als rekening wordt gehouden met een onzekerheidsfactor orde 2, dan is de maximale afstand waarop nog invloed te verwachten is 45 m.

5.11 Samenvatting conclusies trillingen

Rondom het kanaal Almelo – de Haandrik zijn uitgebreide trillingsmetingen uitgevoerd. De metingen zijn beschreven en de resultaten geanalyseerd.

Scheepvaartverkeer

De trillingen van het scheepvaartverkeer blijken klein te zijn. De verwachting is dat deze geen schade kunnen veroorzaken, de marge tussen de rekenwaarde van de trillingsbelasting en de rekenwaarde van de trillingssterkte is groot. De wateroverspanningen die mogelijk met deze trillingen gepaard zouden kunnen gaan zijn zodanig klein dat deze niet zijn waargenomen in de metingen.

Wegverkeer

In de beschouwde panden is ook de kans op schade door verkeer klein. Ook de wateroverspanningen die mogelijk met deze trillingen gepaard zouden kunnen gaan zijn zo klein, dat deze ruim onder het ruisniveau van de opnemers vallen. De aanvullende metingen tot 9 maart 2020 in drie panden langs het kanaal bevestigen de conclusie met betrekking tot het aspect schade.

De trillingen door wegverkeer kunnen wel voelbaar zijn. In geen van de door Movares gemeten panden is sprake van overschrijding van de streefwaarden van de SBR-richtlijn B. In één prioriteitspand is wel sprake geweest van overschrijdingen, maar door de vele stoortrillingen is onduidelijk of dit door de externe bronnen wordt veroorzaakt. Uit de metingen in de geselecteerde panden blijkt dat er geen hoge trillingsniveaus heersen. Als er sprake zou zijn van een algemeen hoog trillingsniveau in de omgeving van het kanaal zou dit bij deze meting zichtbaar moeten zijn. De meting geeft aan dat er geen sprake is van een extreme situatie. Dit sluit niet uit dat de streefwaarde in een aantal panden in dit gebied wordt overschreden. Omdat onder andere de

eigenschappen van de vloer hierbij een rol spelen, kan dit alleen door een (her)meting in het betreffende pand worden vastgesteld.

Installatie damwanden en ankers

Op basis van de trillingsmetingen tijdens het installeren van de damwanden en boordvoorzieningen in 2011 en 2012 blijkt dat tijdens het installeren van de damwanden en dan met name de ankers, de grenswaarden uit de SBR richtlijn overschreden zijn, en niet kan worden uitgesloten dat hierdoor schade is opgetreden aan nabijgelegen panden.

In 2019 zijn metingen uitgevoerd bij vergelijkbare installatie van damwanden. Uit de metingen is een empirische curve voor de 95% bovengrens van de trillingssnelheid afgeleid. Het blijkt dat de trillingssnelheid bij bebouwing gelegen op een afstand van minder dan 45 m van het kanaal de grenswaarde van de richtlijn overschrijdt. Dit betekent dat er bij deze panden een kans op schade is geweest die varieert van 6% op 10 m afstand tot 1% op 45 m afstand. Pandopnamen zijn noodzakelijk om aan te geven welke panden wel of geen schade hebben ondervonden door de werkzaamheden.

Brugsluitingen

Er is een beoordeling uitgevoerd van mogelijke schade door de brugsluitingen tijdens het niet goed functioneren van het besturingssysteem. De beoordeling geeft aan dat de trillingen door ongecontroleerde brugsluitingen waarschijnlijk geen schade hebben veroorzaakt. De pandopnamen geven aan dat er geen schade als gevolg van trillingen is waargenomen.

6 Zettingen van de panden

6.1 Context

Dit hoofdstuk bevat de analyse van een aantal mechanismen die van invloed zijn op de zettingen van de panden.

Paragraaf 6.2 analyseert de invloed van de vervorming van de betonnen damwanden op de naburige bebouwing.

Paragraaf 6.3 analyseert de invloed van de grondwaterstandverhoging door het baggeren (Hoofdstuk 4) op de vervorming van de funderingen van de prioriteitspanden.

Paragraaf 6.4 analyseert de invloed op de grondwaterstand door de aanleg van de zinker bij Geerdijk, en de relatie met de vervorming van de funderingen van de panden rondom de zinker.

Paragraaf 6.5 analyseert verzakkingen van de kruipruimtevloer en het uitspoelen van zand onder de huizen, en de relatie met de werkzaamheden aan het kanaal.

Paragraaf 6.6 geeft een analyse van de ongelijkmatige zettingen als gevolg van ingebrachte klapankers.

6.2 Invloed van mogelijke damwandvervorming op naburige bebouwing

Ruwweg zijn er twee verschillende typen damwanden te onderscheiden langs het kanaal: betonnen damwanden die dateren van ver voor de opwaardering en stalen damwanden.

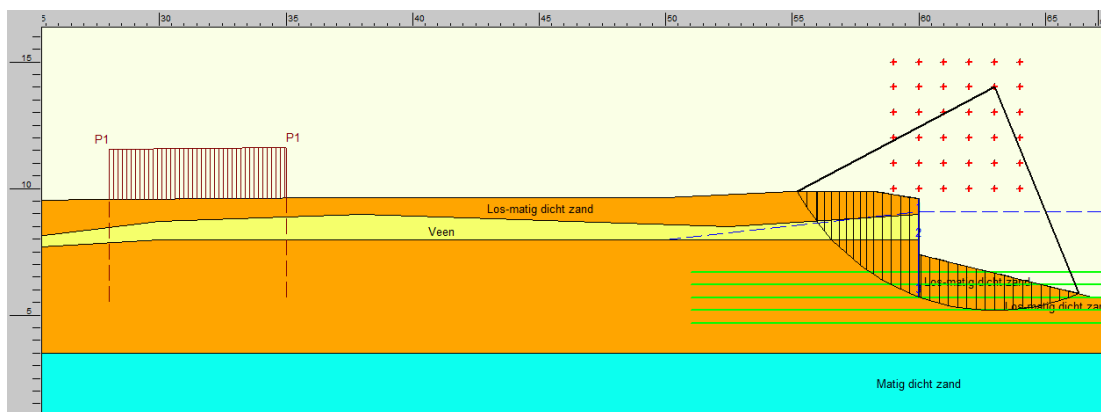
Bij het baggeren zou het weghalen van teveel materiaal aan de voet van de damwanden kunnen leiden tot vervormingen van deze damwanden. De vervormingen kunnen de volgende gevolgen hebben:

- Het ontstaan van spleten tussen de damwandplanken is plausibel, gezien de grootte van de waargenomen vervormingen. Lekkage door deze spleten kan leiden tot verhoging van de grondwaterstand achter de damwand, met als mogelijk gevolg ongelijkmatige zettingen van de funderingen van de panden.
- Zettingen door uitspoeling van zand van achter de damwand door het ontstaan van spleten tussen de damwandplanken
- Meezakken van het materiaal achter de vervormende damwand.
- Instabiliteit van de grond achter de damwand in het geval van extreme vervormingen.

In de volgende deelparagrafen worden deze gevolgen beoordeeld in relatie tot schade aan de nabijgelegen panden.

6.2.1 Situatie

Het is onduidelijk tot welke diepte de betonnen damwanden daadwerkelijk zijn aangebracht. De lengte van deze betonnen damwanden wordt soms op 4 m soms op 6 m aangegeven. Langs verschillende strekkingen zijn de stalen damwanden onderhavig geweest aan corrosie. De lengte van de bestaande stalen damwanden is eveneens onduidelijk; de lengte lijkt te variëren tussen 6 m en 8 m.



Figuur 6.1 Dwarsdoorsnede ter plaatse van een prioriteitspand (aangeduid met 'P1') met de voorgevel op een afstand van 25 m van het kanaal, met maatgevend glijvlak

Figuur 6.1 geeft een dwarsdoorsnede ter plaatse van een prioriteitspand waar grondonderzoek beschikbaar is, en waar de gevel op circa 25 m van het kanaal ligt.

6.2.2 Waargenomen vervormingen van de damwanden

Er is geen indicatie dat de oude stalen damwanden grote vervormingen ondergaan. De damwanden en gording staan in rechte lijnen, ondanks de slechte conditie van sommige van deze damwanden.

Veel van de betonnen damwanden lijken aan de teen wat te zijn verschoven richting het kanaal. Dit is te zien door een scheefstand duikend naar het achterland aan de bovenkant van de betonnen wandjes. De volgende foto in Figuur 6.2 laat dit duidelijk zien. De camera is zo horizontaal mogelijk gehouden terwijl de bovenkant van de wand duidelijk naar achteren helt.



Figuur 6.2 Scheefstand van betonnen damwand langs het kanaal

6.2.3 Verhoging van de grondwaterstand

Paragraaf 4.4.1 bevat een oriënterende analyse van de gevolgen van een spleet tussen de damwandplanken met een breedte van 0,1 m. De spleet is er over de volle hoogte van de damwand. De verwachte maximale verhoging van de grondwaterstand door een dergelijk lek is

23 cm op 8 m van de lekkage, en 11 cm op 25 m. De stijging van grondwater door lekkage in een damwand blijft naar verwachting aanwezig zolang het lek niet wordt gedicht.

Paragraaf 6.3 gaat verder in op de gevolgen van deze grondwaterstandverhoging voor ongelijkmatige zettingen van de funderingen van de panden.

6.2.4 Zettingen door uitspoeling van zand

Naar verwachting zal uitspoeling van zand vooral leiden tot verzakkingen direct achter de damwand. Het is mogelijk dat hierdoor de berm tussen de weg en het kanaal verzakt. Het is niet waarschijnlijk dat er door uitspoeling zettingen van de panden optreden, omdat de meest nabij gelegen panden op circa 10 m uit het kanaal staan.

6.2.5 Meezakken van het materiaal achter de vervormende damwand

Het vervormen van een damwand kan zettingen tot gevolg hebben nabij de damwand zelf. Het is niet waarschijnlijk dat er door zettingen nabij de damwand zettingen van de panden optreden, omdat de meest nabij gelegen panden op circa 10 m uit het kanaal staan.

6.2.6 Instabiliteit van de grond achter de damwand in het geval van extreme vervormingen

Een aantal omwonenden heeft gesuggereerd dat de schade aan panden kan komen door diepere glijcirkels. De glijcirkels zouden het gevolg kunnen zijn van extreme vervormingen van de damwand.

Willen deze glijcirkels invloed hebben op de panden dan moeten dit zeer grote glijcirkels zijn. Berekeningen wijzen uit dat de cirkels beperkt van omvang zijn en zich beperken tot maximaal circa 5 m vanaf de damwand, zie Figuur 6.1. Dit mechanisme heeft dus geen invloed op de panden.

6.2.7 Conclusies

Door het ontstaan van spleten tussen de damwandplanken van een vervormende damwand kan een stijging van de grondwaterstand ter plaatse van de panden optreden. Paragraaf 6.3 gaat verder in op de gevolgen van deze grondwaterstandverhoging voor ongelijkmatige zettingen van de funderingen van de panden.

De stijging is er zolang het lek niet wordt gedicht. De lekkage zou kunnen optreden waar de betonnen damwand is vervormd.

Andere schademechanismen zijn niet waarschijnlijk.

6.3 Invloed van de baggerwerkzaamheden op ongelijkmatige zettingen van de panden

6.3.1 Effect baggerwerkzaamheden op grondwaterstand

De analyse met betrekking tot de invloed van de baggerwerkzaamheden op het grondwater regime is beschreven in hoofdstuk 4 van dit rapport. Hieronder zijn de bevindingen gegeven voor wat betreft de verhoging van de grondwaterstand ter plaatse van de panden en de vertaling daarvan naar de waarden waarmee de berekeningen aan de funderingen zijn uitgevoerd.

De combinatie van de uitgevoerde metingen, de uitgevoerde modelberekeningen en de geohydrologische expertise van Deltares wijst op een maximale stijging van de grondwaterstand van 20 cm bij het prioriteitspand uit de casus, op ongeveer 25 m afstand uit de kanaaloever. Elders in het gebied staan enkele panden dichtbij het kanaal. De minimale afstand tot het kanaal is ongeveer 8 m. Voor deze locaties wordt op basis van de berekeningen bij het prioriteitspand en

de gevoeligheidsanalyse een maximaal theoretisch mogelijke stijging van 45 cm beredeneerd. Zeer waarschijnlijk is dit minder, maar dit is niet met zekerheid uit te sluiten.

In het geval er bij die locaties dichtbij het kanaal ook sprake is van een lekkende damwand, waarbij de oorzaak van een dergelijk lek hier buiten beschouwing wordt gelaten, kan daar orde 20 cm aan permanente stijging van de grondwaterstand bijkomen.

Vanwege bovenstaande redenering is in de berekeningen aan de funderingen daarom uitgegaan van drie scenario's voor wat betreft de stijging van de grondwaterstand: 20 cm, 45 cm en 65 cm.

Voor alle panden geldt dat een stijging van de grondwaterstand alleen tot zetting kan leiden als de grondwaterstand een hoogte bereikt die nog niet eerder is bereikt, bijvoorbeeld als gevolg van neerslag.

6.3.2 Invloed van grondwaterstandverhoging op een poerfundering

De berekening zijn gebruikt om na te gaan of de stijging van de grondwaterstand een mogelijke oorzaak is van ongelijkmatige zettingen die leiden tot de waargenomen schadebeelden aan de panden.

Een stijging van het grondwaterpeil zal leiden tot afname van het draagvermogen van de fundering van de panden met als mogelijk gevolg vervormingen in de ondergrond ter plaatse van het pand. De vervormingen zijn onderzocht in een axiaal-symmetrische PLAXIS simulatie. De berekening is beschreven in Bijlage N.

De berekeningen zijn oriënterend voor een grondopbouw, grondwaterhuishouding, fundering en belastingen die representatief zijn voor panden in het gebied. De berekening is niet representatief voor één specifiek pand. Het doel van de berekeningen is een indruk te krijgen van de orde van grootte van de gevoeligheid van de vervormingen voor de belasting op de fundering van het pand en de stijging van de grondwaterstand.

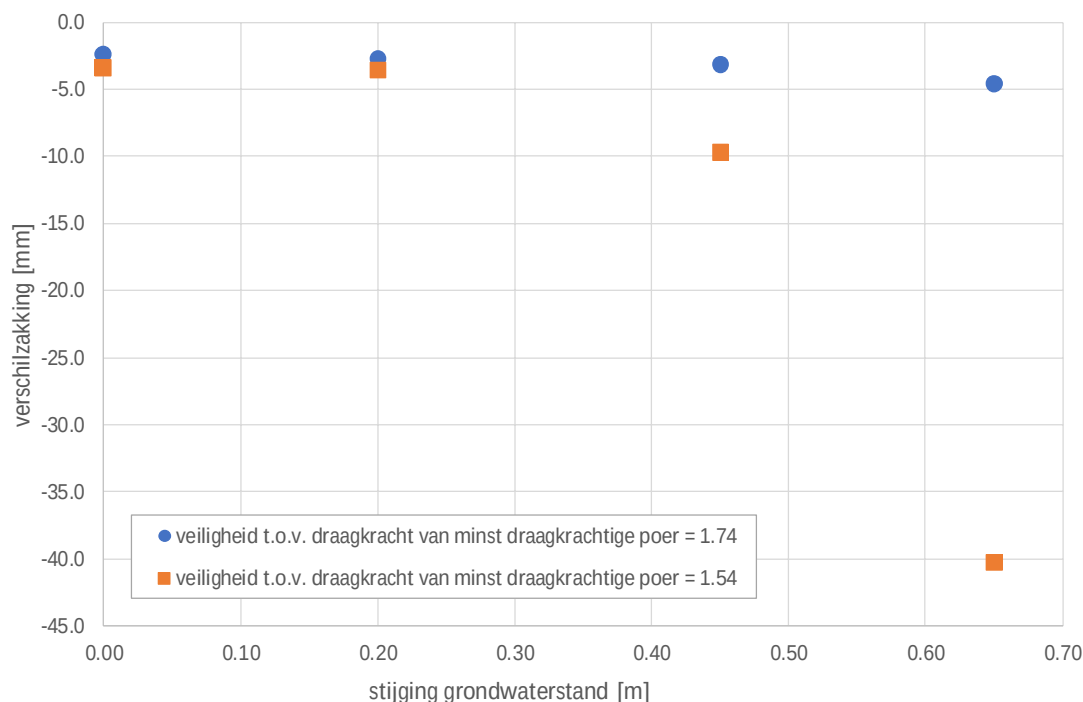
Voor de fundering is uitgegaan van zowel strokenfundering en van een fundering op poeren, waarbij onderstaand eerst de analyse voor de poerenfundering volgt. Voor beide funderingen is uitgegaan van een funderingsniveau op de eerste (natuurlijk voorkomende) vaste zandlaag circa 2 m onder maaiveld. De huizen zijn van oudsher en ook bij volledige nieuwbouw altijd op deze laag gefundeerd.

In de berekeningen is één enkele poer gesimuleerd, met afmetingen van 0,21x0,21 m. De berekeningen zijn gemaakt met variatie van:

- De draagkracht van de ondergrond (uitgedrukt in de wrijvingshoek van de draagkrachtige zandlaag, 32,5 en 35 graden).
- De belasting op de poer (veiligheid ten opzichte van de draagkracht van de minst draagkrachtige poer 1,74 respectievelijk 1,54, volgens een analytische berekening volgens NEN 9997-1).
- De stijging van de grondwaterstand (0,2 m, 0,45 m en 0,65 m).

De draagkracht van de minst draagkrachtige poer is bepaald met verwachtingswaarden bij een stijging van de grondwaterstand gelijk aan 0. De gebruikte waarden van de veiligheid ten opzichte van de draagkracht van de minst draagkrachtige poer van 1,74 respectievelijk 1,54 zijn kleiner dan de vereiste veiligheid volgens de gangbare norm NEN 8700 [19]. Volgens deze norm zou de veiligheid ongeveer 2,5 moeten bedragen.

Figuur 6.3 geeft de berekende verschilzakking tussen een poer op een minder draagkrachtige zandlaag (wrijvingshoek 32,5 graden) en een poer op een meer draagkrachtige zandlaag (wrijvingshoek 35 graden), als gevolg van een stijging van de grondwaterstand tot een niveau dat nog niet eerder is bereikt, bijvoorbeeld als gevolg van neerslag. De verschilzakking is berekend bij twee belastingniveaus van de minst draagkrachtige poer: veiligheid ten opzichte van de draagkracht 1,74 (blauwe punten in Figuur 6.3) en veiligheid ten opzichte van de draagkracht 1,54 (oranje punten in Figuur 6.3). Het blijkt dat de zakking van de meer draagkrachtige poer, zelfs bij de hogere belasting gering is. De berekende verschilzakkingen zijn dus bijna gelijk aan de absolute zakking van de minder draagkrachtige poer. Bij de berekening van de verschilzakking is geen rekening gehouden met herverdeling van belasting in de constructie van het pand.



Figuur 6.3 Verschilzetting tussen een poer op een minder draagkrachtige zandlaag en een poer op een meer draagkrachtige zandlaag, als gevolg van een stijging van de grondwaterstand boven het niveau dat nog niet eerder is bereikt, voor verschillende belastingniveaus van de poer

De berekeningen en de resultaten in Figuur 6.3 wijzen uit:

- Bij een belastingniveau waarbij de veiligheid ten opzichte van het draagvermogen van de minst draagkrachtige poer 1,74 is, is het effect van de verhoging van de grondwaterstand gering.
- Bij een hoger belastingniveau, waarbij de veiligheid ten opzichte van het draagvermogen van de minst draagkrachtige poer 1,54 is, is het effect van stijging van de grondwaterstand aanzienlijk. Tot 0,20 m stijging is de verschilzakking beperkt; bij 0,45 m stijging is de verschilzakking substantieel (10 mm); bij nog grotere stijging van de grondwaterstand is de verschilzakking erg groot.
- Bij nog hogere belastingniveaus, zal het effect van stijging van de grondwaterstand op de verschilzakking ook bij geringe stijgingen al substantieel zijn.
- Het is nodig om kennis te hebben van het werkelijke belastingniveau en de draagkracht van de poeren om een conclusie te kunnen trekken over het effect van de stijging van de grondwaterstand op de verschilzakking, en de schade als gevolg van de verschilzakking.
- Het werkelijke belastingniveau, het draagvermogen van de poeren en de stijging van de grondwaterstand dienen per pand te worden vastgesteld. Het is niet mogelijk om een gebiedsbrede relatie te geven tussen de stijging van de grondwaterstand en de verschilzakking.

6.3.3 Invloed van grondwaterstandverhoging op een strokenfundering

Een deel van de panden heeft een strokenfundering. De funderingsdruk op de ondergrond onder een strokenfundering is aanzienlijk lager dan onder een poerenfundering. Het is niet te verwachten dat een stijging van de grondwaterstand in de orde van 0,65 m zal leiden tot significante vervormingen van een strokenfundering die in goede staat verkeert.

6.3.4 Historische Informatie prioriteitspanden

Van de 26 prioriteitspanden die representatief zijn voor woningen zijn er 20 met schade die waarschijnlijk is gerelateerd aan ongelijkmatige zettingen. Bij vier van deze panden is historische informatie over een deel van de scheuren beschikbaar:

- Van één pand stelt een taxatierapport uit 2010 dat de bouwkundige staat goed was.
- Van drie panden was een deel van de scheuren vóór de werkzaamheden al aanwezig.

6.3.5 Conclusies prioriteitspanden

Van de 20 prioriteitspanden met schade die waarschijnlijk is gerelateerd aan ongelijkmatige zettingen hebben 7 panden een poerenfundering en 3 panden een strokenfundering (zie Tabel 3.1). Van 10 panden is niet bekend wat de fundering is. De afstand van deze 20 panden tot het kanaal varieert tussen 10 en 29 m.

De conclusies voor deze 20 prioriteitspanden zijn:

- Voor de panden met een strokenfundering is het niet waarschijnlijk dat er een verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade, vanwege het gestelde in paragraaf 6.3.3.
- Als er ter plaatse van de panden is gebaggerd in een droge periode is het niet waarschijnlijk dat de grondwaterstand als gevolg van het baggeren is gestegen boven een niveau dat nog niet eerder is bereikt. In dat geval is een relatie tussen het baggeren en de waargenomen schade niet waarschijnlijk.
- Als in de nabijheid van de panden met poerenfundering en de panden met een onbekende fundering is gebaggerd in een natte periode is de kans op schade door het baggeren afhankelijk van:
 - Het funderingstype (poeren- of strokenfundering).
 - De marge tussen de belasting en de draagkracht van de minst draagkrachtige poeren van fundering.
 - De stijging van de grondwaterstand boven een niveau dat nog niet eerder is bereikt, bijvoorbeeld als gevolg van neerslag.
 - De nabijheid van een vervormde damwand met lekkage.
 - De afstand van het pand tot het kanaal.
- Het werkelijke belastingniveau en draagvermogen van de poeren en de stijging van de grondwaterstand dienen per pand te worden vastgesteld.
- Van een beperkt aantal panden is historische informatie beschikbaar om vast te stellen welke schade al voor het baggeren aanwezig was.

6.3.6 Conclusies overige panden in het gebied

Voor de panden in het gebied geldt dat:

- Voor panden met een strokenfundering is het niet waarschijnlijk dat er een verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade, vanwege het gestelde in paragraaf 6.3.3.
- Als er ter plaatse van de panden is gebaggerd in een droge periode is het niet waarschijnlijk dat de grondwaterstand als gevolg van het baggeren is gestegen boven een niveau dat nog niet eerder is bereikt. In dat geval is een relatie tussen het baggeren en de waargenomen schade niet waarschijnlijk.

- Als in de nabijheid van de panden is gebaggerd in een natte periode is de kans op schade door het baggeren afhankelijk van:
 - Het funderingstype (poeren- of strokenfundering).
 - De marge tussen de belasting en de draagkracht van de minst draagkrachtige poeren van fundering.
 - De stijging van de grondwaterstand boven een niveau dat nog niet eerder is bereikt, bijvoorbeeld als gevolg van neerslag.
 - De nabijheid van een vervormde damwand met lekkage.
 - De afstand van het pand tot het kanaal.
- Het werkelijke belastingniveau en draagvermogen van de poeren en de stijging van de grondwaterstand dienen per pand te worden vastgesteld. Het is niet mogelijk om een gebiedsbrede relatie te geven tussen de stijging van de grondwaterstand en de verschilzakking.

6.4 Invloed op de grondwaterstand door de aanleg van de zinker bij Geerdijk

Nabij de brug te Geerdijk (circa km 12,8) is een zinker aangelegd waarbij eveneens de bodem en de weerstandslaag (tijdelijk) zijn uitgegraven. Deze zinker is aangebracht op een diepste niveau van NAP +3,65 m (kanaal bodem is NAP +5,5 m). Hierbij is dus de kanaal bodem over een beperkte breedte circa 2,5 m ontgraven. Hierbij zijn voor zover bekend geen tijdelijke of permanente damwanden ingebracht of andere werkzaamheden verricht die ontlasting of zettingen van de ondergrond zouden kunnen bewerkstelligen of trillingen genereren.

De ontgraving heeft waarschijnlijk wel een lokale tijdelijke beperkte grondwaterstandsverhoging tot gevolg gehad. Gezien de beperkte omvang van deze ontgraving ten opzichte van de baggerwerkzaamheden zal de grondwaterstandsverhoging minder zijn dan als gevolg van de baggerwerkzaamheden. Het is zeer onwaarschijnlijk dat de grondwaterstandsverhoging door de aanleg van de zinker heeft geleid tot ongelijke zettingen van naburige panden.

6.5 Verzakkingen van de kruipruimtevloer en uitspoelen van zand onder de huizen

Verscheidene bewoners hebben aangegeven dat de diepte van hun kruipruimte groter is geworden in de tijd. De angst leeft dat er zand onder het gehele pand uitspoelt, daarmee de fundering wordt aangetast en schade ontstaat. De verzakking van de kruipruimtevloer wordt geïllustreerd door onderstaande foto.



Figuur 6.4 Detailfoto genomen vanuit de kruipruimte waarbij aan de rechterzijde een poer is te zien en bovenin de horizontale ligger waar de muren van het huis op rusten. Onder de horizontale ligger is duidelijk een 'spleet' te zien tussen de legger en de vloer van de kruipruimte

De foto in Figuur 6.4 geeft de spleet weer tussen de horizontale ligger en de bodem vloer van de kruipruimte. De bewoner wist zich te herinneren dat de hoogte van de kruipruimte circa 30 jaar geleden circa 25 cm minder was dan nu. Bij nadere bestudering van de vloer van de kruipruimte bleek onder veen aanwezig te zijn onder het bovenste zandlaagje van enige centimeters dikte. Volgens de bewoner is het pand gefundeerd door een gat door het veen te boren, het gat te vullen met beton en daarop metselwerk poeren aan te brengen. De grond onder de kruipruimte bestaat dus grotendeels uit een veenlaag van circa 1 m dikte op de eerste draagkrachtige zandlaag waarop de poeren zijn gefundeerd. Dit veen bevindt zich voor een groot deel boven de grondwaterspiegel en kan als gevolg van oxidatie op natuurlijke wijze inklinken. Hierdoor neemt het volume af en neemt de hoogte van de kruipruimte toe. Dit proces kan spelen bij panden met eenzelfde funderingswijze. De snelheid van oxidatie hangt daarbij af van de lokale grondwatersituatie.

Dit proces geeft een verklaring voor verzakkingen en uitspoelingen langs de gevels van panden, in het gebied vaak als 'sinkhole' aangeduid. De foto hieronder schetst een beeld van deze verzakkingen.



Figuur 6.5 Verzakkingen langs de gevel van hetzelfde pand waar inklink van het veen onder de kruipruimte is geconstateerd

Wanneer het veen in de kruipruimte inklinkt en er geen aansluiting meer is tussen de onderkant van de horizontale ligger van de fundering en de kruipruimte vloer, zal regenwater dat langs de gevel terechtkomt voor een gedeelte zijn weg vinden naar de kruipruimte. Dit regenwater kan de grond onder de horizontale ligger wegspoelen waardoor er verzakkingen optreden direct langs de gevel. Bij doorgaande uitspoeling kan er zelfs een gat ontstaan naast de gevel dat uitmondt in de kruipruimte. Dit is het geval bij het pand waar de foto's zijn gemaakt. Dit kan leiden tot wateroverlast in de kruipruimte of in de kelder.

Het oxideren van veen leidt tot een afname van het gewicht van de grond onder de kruipruimte, en daarmee tot een afname van de draagkracht van de poerenfundering. Dit kan leiden tot ongelijkmatige zettingen van het pand.

Het oxideren van veen is een natuurlijk proces en heeft geen relatie tot de werkzaamheden aan het kanaal.

6.6 Indicatie van ongelijke zettingen als gevolg van ingebrachte klapankers

6.6.1 Achtergrond van het mechanisme

Als onderdeel van de opwaardering van het kanaal in de periode 2011-2016 is in de periode van het 2^{de} deel van 2011 tot het voorjaar 2012 een aantal wachtplaatsen aangelegd en zijn boordvoorzieningen aangebracht (zie ook Tabel 1.2). De damwanden die hiervoor zijn ingebracht zijn verankerd met klapankers. Klapankers zijn ankers die trillend worden ingebracht en vervolgens worden teruggetrokken waarna het anker uitklapt. Figuur 6.6 geeft een idee van de werking van een klapanker.



Figuur 6.6 schematisch overzicht van de werking van een klapanker

Dit type anker resulteert lokaal in een behoorlijke verstoring in de ondergrond met name direct achter het anker. Er ontstaat een zekere 'holle' ruimte achter het anker. Deze ankers zijn in verschillende typen en onder verschillende hoeken met verschillende lengten in de ondergrond aangebracht bij de aanleg van de wachtplaatsen en boordvoorzieningen. De lengten variëren van 9 m tot 15 m en de hoeken van 18 tot 35 graden. Bij deze lengten en onder deze hoeken komen sommige ankers heel dichtbij of zelfs onder de fundering van sommige panden die op korte afstand van het kanaal staan. De afstand tussen de ankers hangt af van de situatie en is soms zelfs variabel binnen één wand. Bijvoorbeeld: voor boordvoorziening 2 is de afstand afwisselend 1,86 m en 5,27 m.

6.6.2 Modelleren van de zakkingen

In bijlage P worden twee modellen voor de gevolgen van het aanbrengen van klapankers uitgewerkt. Het eerste model komt uit de aanleg van boortunnels. Dit is een empirisch model. Het wordt het 2D model genoemd omdat langs een geboorde tunnelde zakking in alle doorsneden achter de boormachine gelijk zijn. Voor de problematiek van de klapankers is er ook een model opgesteld dat berust op volume behoud van de ondergrond. Dit model wordt het 3D model genoemd, omdat de berekende zakking in alle horizontale richtingen optreedt.

Als verschillende klpankers naast elkaar worden geplaatst ontstaat boven elk klpanker een cirkelvormig zakkingsgebied. Als de ankers diep worden geplaatst zijn de zakkingsgebieden klein en gespreid over een groter gebied. Als de ankers dicht bij elkaar worden geplaatst overlappen de zakkingsgebieden en ontstaat een zakkingsgebied dat lijkt op de 2D situatie.

De zakking is het grootste midden boven het klpanker en neemt dan af met de horizontale afstand vanaf het maximum. Op een zekere afstand is de zakking klein verondersteld en wordt deze gelijk aan nul gekozen. In het 2D model is deze afstand de halve breedte van de zakkingsstrook. In het 3D model is deze afstand de straal van de cirkelvormige zakkingsstrook.

6.6.3 Beoordeling van de zakkings

Als de grond onder een fundering zakt, ontstaan er spanningen in de constructie. Afhankelijk van de sterkte van de constructie en de al aanwezige spanningen kan dit tot scheurvorming leiden als de spanningen de sterkte overschrijden.

Bijlage O beschrijft de methode voor de beoordeling van de zakkings. Het optreden van schade wordt beoordeeld op basis van de relatieve rotatie van de funderingselementen.

6.6.4 Conclusies voor de prioriteitspanden

Er zijn twee prioriteitspanden die worden beïnvloed door de klpankers. Deze twee worden hier verder uitgewerkt:

- Bij het eerste prioriteitspand zijn de ankers 15 m lang van het type MR-1. Deze worden ingebracht onder een hoek van 25° . De kop bevindt zich 0,3 m onder maaiveld, zodat volgt dat het anker 6,7 m onder maaiveld zit en dus ongeveer 4,7 m onder het funderingsniveau. Het anker bevindt zich 13,6 m achter de wand. Het prioriteitspand staat meer dan 20 m vanaf de wand en dus buiten het invloedsgebied van het anker. Er wordt geen schade verwacht door dit mechanisme.
- Bij het tweede prioriteitspand zijn ankers aangebracht, 10 m lang van het type MR-SR. Deze worden ingebracht onder een hoek van 35° . De kop bevindt zich 1,3 m onder maaiveld, zodat volgt dat het anker 7,0 m onder maaiveld zit en dus ongeveer 5,0 m onder het funderingsniveau. Het pand staat ongeveer 8 m van de damwand, dat betekent dat het klpanker zich recht onder de fundering bevindt. De 3D beschouwing geeft een zakking van 3,6 mm met een straal van 2,1 m, de 2D beschouwing geeft een zakking van 7,3 mm met een halve strookbreedte van 3,2 m. Als voorbeeld wordt gekozen dat de afstand tussen de poeren 2 m is. De te beoordelen relatieve hoekverdraaiing β voor de 3D situatie is $3,4 \times 10^{-3}$. Voor de 2D situatie is de te beoordelen relatieve hoekverdraaiing $\beta = 7,3 \times 10^{-3}$. De conclusie volgens de methode in Bijlage O is dat voor dit pand matige tot ernstige schade wordt verwacht. De panden in de omgeving staan soms op dezelfde afstand, en soms al enkele meters verder weg, zodat die panden al bijna buiten het zakkingsgebied staan.

Eén van de naburige panden van het eerste prioriteitspand staat 15 m achter de wand en dus vlak achter de plaats van het anker. De 3D beschouwing geeft een zakking van 1,5 mm met een straal van 2,0 m, de 2D beschouwing geeft 3,0 mm met een halve strookbreedte 3,0 m. Omdat de toegepaste ankers hier kleiner zijn dan bij het tweede prioriteitspand, wordt hier een kleinere zakking gevonden. Wordt weer een afstand tussen de poeren van 2 m verondersteld, dan wordt de volgende schade-indicatie gevonden. Voor de 3D situatie is de te beoordelen relatieve hoekverdraaiing $\beta = 1,4 \times 10^{-3}$. Voor de 2D situatie is de te beoordelen relatieve hoekverdraaiing $\beta = 2,9 \times 10^{-3}$. De conclusie volgens de methode in Bijlage O is dat voor dit pand lichte schade wordt verwacht.

6.6.5 Positie en invloed klapankers gebiedsbreed

Voor alle aangebrachte ankers is nagegaan of er panden direct langs de aangelegde wachtplaatsen en boordvoorzieningen staan en hoe de positie van die ankers zich verhoudt tot de aanwezige panden.

Voor alle damwandbestekken is nagegaan op welke afstand en diepte de ankers zich bevinden. De vervormingstrog op 2 m onder maaiveld is bepaald, omdat de meeste panden op dat niveau zijn gefundeerd. Daarna is op basis van de vervormingstrog en de afstand van de panden tot de damwand nagegaan of er panden binnen het verwacht zakkingsgebied staan.

Tabel 6.1 geeft aan bij welke wachtplaatsen er panden in het invloedsgebied staan. De informatie is gebaseerd op de informatie in de bestekken. Tevens is aangegeven hoeveel panden het betreft, met welke vervorming moet rekening worden gehouden en of de damwand zelf is vervangen.

Tabel 6.1 Samenvatting damwanden met ankers nabij funderingen

Constructie	Begin [km]	Eind [km]	Zijde	Panden	Afstand	Smax,2D [mm]	Smax,3D [mm]	Diepte anker [m]	Wand
WP7	19.85	19.97	west	9	beide	3.8	1.1	8.96	bestaand
WP6	19.44	19.60	oost	5	rand	5.9	2.5	3.98	bestaand/nieuw
WP5	12.87	13.11	oost	2	rand	3.0	2.0	4.35	nieuw
WP5	12.90	13.06	west	1	nabij	3.0	2.0	3.98	nieuw
WP4	12.46	12.71	west	2	beide	2.9	1.8	4.69	nieuw
WP4	12.52	12.68	oost	12	nabij	2.5	4.2	5.23	nieuw
BV2	9.91	10.07	west	9	nabij	2.6	2.3	4.09	bestaand
WP3	8.62	8.80	west	8	beide	6.0	21.0	2.45	nieuw/bestaand
WP1	0.56	0.68	oost	5	rand	3.1	3.3	3.42	bestaand

Het is niet mogelijk alle nuances in deze tabel te vangen. Voor een aantal constructies zijn verschillende type ankers voorzien en ook de stramienafstand tussen de ankers is soms variabel, terwijl op sommige locaties ook de ankers onder verschillende hoeken zijn aangebracht. De hoogte van de ankerkop varieert, aangehouden is 0,35 m onder maaiveld als conservatieve waarde. De funderingsdiepte is standaard op 2 m gesteld.

Bij WP5 aan de westzijde zijn extra ankers ter plaatse van de bolders aangebracht. De ankerstangen van deze ankers zijn iets langer en hebben een zwaarder anker. De invloedszones overlappen elkaar, zodat ter plaatse van de bolders grotere zakkingen kunnen zijn opgetreden.

Bij WP4 aan de oostzijde liggen de ankers van de extra verankeringen (met een stramien van 13,8 m) vlakbij de ankers van de standaard verankering (met een stramien van 3,8 m). In Tabel 6.1 is het 2D resultaat voor de standaard verankering en het 3D resultaat voor de extra verankering voor de bolders. Ter plaatse van de bolders wordt dus de som van beide waarden verwacht. Dit effect is bij meer wachtplaatsen met bolders te verwachten.

Vooraf bij WP3 levert het 3D model een grote waarde, dit is de uitkomst voor de zware ankers ter plaatse van de bolders. Deze ankers liggen onder een kleine hoek. Voor één pand liggen de ankers dicht bij de hartlijn van de fundering. Echter, bij dit pand ligt het anker ter plaatse van de bolder naast het pand en is de situatie veel minder extreem dan de tabel suggereert.

Als voorbeeld kan het pand aan de westzijde van WP5 verder worden uitgewerkt. De maximale zetting is 3 mm. De diepte van het anker is 4 m. Voor de situatie dat een poer op het diepste punt van de zakkingsrog staat en de naastgelegen poer op 3 m afstand naast de rog staat (en dus geen zakking ondergaat) wordt voor de relatieve rotatie een waarde in de orde van $2 \cdot 10^{-3}$ gevonden. Dit voldoet aan het criterium voor lichte schade.

De werkelijk opgetreden schade dient per pand worden beoordeeld, door voor elk pand nauwkeurig na te gaan waar de ankers en poeren zitten. De zettingstrogen hebben immers een beperkte omvang, dus de werkelijke uitkomsten zijn gevoelig voor de details. Dan kan de bovenstaande afleiding worden uitgewerkt en de werkelijke verwachte schade worden bepaald.

Het is mogelijk dat het uitklappen van het eerste anker onder een pand schade veroorzaakt. Het pand is daarmee ook gevoeliger geworden voor het uitklappen van één of meer volgende ankers onder het pand. Dit cumulatieve effect is niet meegenomen in de huidige beschouwing.

6.6.6 Conclusies gebiedsbreed

Het installeren van klapankeers onder een poerenfundering kan leiden tot ongelijkmatige zettingen. Ongeveer 50 panden in het gebied staan nabij of in de zakkingsrog van de klapankeers. De schadeverwachting voor deze panden is afhankelijk van het type ankers, de precieze locatie van de ankers en het type fundering. Een stroken fundering zal anders reageren op de zakkings, maar ook bij dat type is schade als gevolg van het installeren van de ankers niet uit te sluiten. De kans dat daadwerkelijk schade is opgetreden door zakkings als gevolg van installatie van deze ankers is reëel, maar dient per pand te worden vastgesteld.

7 Beoordeling potentiële schade oorzaken prioriteitspanden

7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van het uitgevoerde onderzoek en verbindt daarmee de mogelijke oorzaken van schade met de geconstateerde schade.

Uit de informatieavonden en de gesprekken tussen de bewoners en zaakbehartigers van de Provincie zijn de volgende mogelijke externe oorzaken (bronnen buiten de woning zelf) voor de schade naar vorgekomen:

- Baggerwerkzaamheden in het kanaal.
- Zwaardere transport op de weg langs het kanaal.
- Zwaardere scheepvaart in het kanaal.
- Ongecontroleerd (hard) sluiten van de brug (Vroomshoop).
- Inbrengen van nieuwe damwanden en ankers / het verwijderen van damwanden en ankers.
- Inbrengen van ankers van bestaande damwanden.
- Het mogelijk deformeren/bezwijken van de damwanden.
- Aanbrengen en onderhoud aan drempels in de weg langs het kanaal / verzwaring en groot onderhoud aan N750.
- Wegspoelen van zand onder de funderingen en dalende kruipruimte vloer.
- Aanbrengen van een zinker in het kanaal.

Deze aspecten zullen in de volgende paragrafen worden geadresseerd. Op basis van de resultaten uit voorgaande hoofdstukken is het niet goed mogelijk om te identificeren waar verschillende werkzaamheden of mogelijke externe oorzaken elkaar hebben versterkt.

7.2 Invloed van de baggerwerkzaamheden op ongelijkmatige zettingen

De conclusies voor de 20 prioriteitspanden met schade die waarschijnlijk is gerelateerd aan ongelijkmatige zettingen zijn:

- Voor de 3 panden met een strokenfundering is het niet waarschijnlijk dat er een verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade.
- Als er ter plaatse van de 7 panden met poerenfundering en de 10 panden met onbekend funderingstype is gebaggerd in een droge periode is het niet waarschijnlijk dat de grondwaterstand als gevolg van het baggeren is gestegen boven een niveau dat nog niet eerder is bereikt. In dat geval is een relatie tussen het baggeren en de waargenomen schade niet waarschijnlijk.
- Als in de nabijheid van de 7 panden met een poerenfundering of de 10 panden met onbekend funderingstype is gebaggerd in een natte periode is de kans op schade door het baggeren afhankelijk van:
 - Het funderingstype; voor panden met een strokenfundering is het niet waarschijnlijk dat er een verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade.
 - De marge tussen de belasting en de draagkracht van de minst draagkrachtige poeren van fundering.
 - De stijging van de grondwaterstand boven een niveau dat nog niet eerder is bereikt.
 - De nabijheid van een vervormde damwand met lekkage.
 - De afstand van het pand tot het kanaal.

- Het werkelijke belastingniveau en draagvermogen van de poeren en de stijging van de grondwaterstand dienen per pand te worden vastgesteld.
- Van een beperkt aantal panden is historische informatie beschikbaar om vast te stellen welke schade al voor het baggeren aanwezig was.

7.3 Mogelijke waterschade door baggerwerkzaamheden

Tijdens de baggerwerkzaamheden van 2011 – 2012 kan door het weghalen van de sliblaag op de kanaalbodem in de directe omgeving daarvan een stijging van de grondwaterstand zijn voorgekomen gedurende een periode van hooguit enkele dagen. Overal langs het kanaal waar panden staan, kan dit hebben geleid tot extra natte kruipruimtes en kelders en optrekkend vocht. Als niet in een natte periode werd gebaggerd is het onwaarschijnlijk dat het baggeren heeft geleid tot wateroverlast, tenzij er structureel (elke winter) wateroverlast is.

Een extra stijging van de grondwaterstand zou in de natte winterperiode van 2011 – 2012 ook kunnen hebben geleid tot opbarsten van keldervloeren, schade aan afdichtingen van kruipruimtes en extra zware wateroverlast. Dit kan echter alleen zijn opgetreden in panden als de grondwaterstand bij deze panden hoogtes bereikt heeft die in de jaren daarvoor nog niet eerder bereikt waren. Er zijn geen schademeldingen die wijzen op opbarsten van de keldervloer en schade aan de afdichting van de kruipruimte, gedurende die periode.

7.4 Invloed van trillingen door zwaar wegtransport

De invloed van zwaar verkeer is bepaald tijdens de verschillende meetcampagnes langs een aantal panden langs het kanaal Almelo – de Haandrik. Ook deze metingen, analyses en conclusies zijn uitgebreid beschreven in dit rapport in Hoofdstuk 5. Er zijn gedurende één week metingen uitgevoerd aan de appartementencomplexen A en B (beide prioriteitspanden) en een pand in de omgeving. Langere duur metingen zijn uitgevoerd op drie prioriteitspanden en een niet-prioriteitspand.

Al hoewel uit de metingen blijkt dat het zware verkeer dusdanige trillingen genereren dat deze voelbaar zijn, is de conclusie dat de rekenwaarden voor de gemeten trillingen een factor 4 onder de grenswaarde conform de SBR richtlijn A voor schade blijven. Uit de bemande metingen met een zeer zwaar transport (kraanvrachtwagen) en een geladen kieper achter een tractor, wat door omwonenden aangegeven wordt als een zeer voelbare en potentiële schade oorzaak aan de panden, blijkt dat geen overschrijding van de grenswaarde voor schade is opgetreden.

Het is daarom onwaarschijnlijk dat de trillingsbron “zwaar verkeer” schade veroorzaakt of heeft veroorzaakt. Deze conclusie wordt bevestigd door de aanvullende waarnemingen tot en met 8 maart aan twee prioriteitspanden en een niet-prioriteitspand.

7.5 Trillingen als gevolg van de scheepvaart

Gedurende de bemande meetcampagne hebben er verschillende scheepspassages plaatsgevonden waarvan de passage van schip 2 als maatgevend naar voren kwam. Ook is schip 1 gepasseerd die vergelijkbare trillingsniveaus heeft gegenereerd aan het pand en de fundering. Dit zijn tevens de namen van de schepen die door omwonenden worden genoemd als de schepen die de grootste trillingen veroorzaken. Er zijn gedurende één week metingen uitgevoerd aan appartementencomplexen A en B (beide prioriteitspanden) en een pand in de omgeving. Langere duur metingen zijn uitgevoerd op drie prioriteitspanden en een niet-prioriteitspand.

Uit de metingen blijkt dat de trillingssnelheden als gevolg van de grotere scheepvaart in de orde grootte liggen van 0,1 mm/s tot 0,3 mm/s. In de veronderstelling dat in het pand nog enige versterking kan optreden, is het aannemelijk dat de passage van zwaar schepen kan worden

gevoeld in de panden. Echter conform de SBR richtlijn A voor schade is geen schade te verwachten aan de panden als gevolg van de scheepvaart.

Hieruit lijkt het onwaarschijnlijk dat de trillingsbron “scheepvaartverkeer” schade veroorzaakt of heeft veroorzaakt. Deze conclusie wordt bevestigd door de aanvullende waarnemingen tot en met 8 maart aan twee prioriteitspanden en een niet-prioriteitspand.

7.6 Disfunctioneren van het sluitmechanisme van de Puntbrug

Tijdens de bemande metingen nabij de puntbrug zijn er verschillende brugsluitingen opgenomen. Het ongecontroleerd sluiten van de brug is een situatie die niet één-op-één weer kan worden nagebootst. Hoofdstuk 5.6 beschrijft de vertaling van de metingen tijdens normale sluitingen naar een situatie tijdens een mogelijk ongecontroleerde brugsluiting. Daartoe is een model uitgewerkt om de uitgevoerde metingen op te schalen naar de veronderstelde valhoogte tijdens het disfunctioneren van het sluitmechanisme.

Hieruit volgt dat bij een valhoogte van 1 m de rotatiesnelheid tijdens de klap 28 maal zo groot is. Bij een valhoogte van 3 m is de rotatiesnelheid tijdens de klap 50 maal zo groot is als bij de huidige sluitingsprocedure. De gemeten grootste trillingssnelheid tijdens de extra sluitingen was 0,05 mm/s. Opschalen geeft een maximale trillingssnelheid van 2,5 mm/s.

Toetsing van de resultaten van de metingen aan de SBR richtlijn A tonen aan dat het niet aannemelijk is dat schade is ontstaan aan de appartementsgebouwen A en B (beide prioriteitspanden) als gevolg van de brugsluitingen. De verwachting is dat de trillingen soms wel voelbaar zijn, maar niet boven de streefwaardes voor trillingshinder zullen uitkomen.

De pandopnamen geven aan dat er geen schade als gevolg van trillingen is waargenomen.

7.7 Intrillen van damwanden en ankers in 2011 en 2012

Tijdens de aanleg van de passeerplaatsen zijn nieuwe damwanden geplaatst. Bij de uitvoering van deze werkzaamheden zijn veelal trillingsmetingen uitgevoerd. De verslaglegging van deze metingen is zeer beperkt uitgevoerd. In de meeste situaties is uitsluitend per dag aangegeven wat het trillingsniveau in een opnemer is geweest, waarbij niet aangegeven is waar precies is gemeten. Het is eveneens onduidelijk of er continu is gemeten bij het plaatsen van de damwanden. De nadere analyse van deze gegevens is beschreven in Hoofdstuk 5.10.

Een belangrijke conclusie is dat op basis van de meetgegevens die zijn aangeleverd en aannames die gemaakt zijn om een interpretatie mogelijk te kunnen maken, ondanks de gebrekkige verslaglegging, kan worden gesteld dat op een aantal plaatsen de grenswaarden van de SBR-richtlijn deel A is overschreden. Het betreft 5 van de 22 meetresultaten, dat is 23%. Hierdoor kan zeker niet worden uitgesloten dat het inbrengen van de damwanden en ankers in 2011–2012 tot schade heeft geleid bij woningen in de directe nabijheid van deze werkzaamheden. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de rapportage van de uitgevoerde metingen onvolledig is.

Op basis van dit resultaat en de kans op schade bij overschrijding, kan worden geconcludeerd dat er bij de uitvoering van de damwanden in 2011-2012 waarschijnlijk wel schade is veroorzaakt aan een beperkt aantal panden.

Voor schade aan de fundering door verdichting door het intrillen van damwanden gelden een snelheidscriterium en een versnellingscriterium. Het snelheidscriterium leidt in dit geval tot een hogere grenswaarde en is dan ook niet maatgevend. Het versnellingscriterium ligt ruim onder de eis van, zodat niet verwacht wordt dat schade door verdichting optreedt.

Uit combinatie van de modelvoorspellingen van de schade en de pandopnamen worden voor de 6 prioriteitspanden waar de scheuren mogelijk zijn gerelateerd aan trillingen de volgende conclusies getrokken:

- Voor drie prioriteitspanden zijn trillingen uit damwandinstallatie een waarschijnlijke oorzaak van de schade. De geëxtrapoleerde trillingen waren hoog en de pandopnames wijzen op schade door trillingen. Voor één prioriteitspand wordt deze conclusie ondersteund door historische informatie.
- Voor de drie overige prioriteitspanden wijzen de analyses uit dat de schade waarschijnlijk niet is gerelateerd aan trillingen door installatie van de damwanden van het kanaal.

7.8 Invloed van mogelijke damwandvervorming op naburige bebouwing

Het ontstaan van spleten tussen de damwandplanken is plausibel, gezien de grootte van de waargenomen vervormingen. Lekkage door deze spleten kan leiden tot een stijging van de grondwaterstand ter plaatse van de panden. Paragraaf 7.2 geeft conclusies over de gevolgen van deze grondwaterstandverhoging voor ongelijkmatige zettingen van de funderingen van de panden.

De stijging is er zolang het lek niet wordt gedicht. De lekkage zou kunnen optreden waar de betonnen damwand is vervormd.

Andere schademechanismen ten gevolge van de damwandvervorming zijn niet waarschijnlijk.

7.9 Invloed van werkzaamheden aan parallelwegen langs het kanaal

In het verleden zijn verschillende werkzaamheden verricht aan de N750 en de overige parallelwegen langs het kanaal Almelo – de Haandrik. Deze werkzaamheden verschillen van licht bestratingswerk tot ingrijpendere werkzaamheden als de aanleg van verkeersdrempels en complete vernieuwing van de verharding. Hierbij is de onderliggende veengrond soms (gedeeltelijk) vervangen door zand.

Werkzaamheden als het vervangen van veen door zand, herprofilering van het wegdek en de aanleg van verkeersdrempels verhogen de belasting op de ondergrond. Dit kan zettingen van de veenlaag veroorzaken. De zettingen op het niveau van de poeren- of strokenfundering ter plaatse van de gevels zijn naar verwachting zodanig klein dat schade door ongelijkmatige zettingen niet waarschijnlijk is.

7.10 Verzakkingen van de kruipruimtevloer en uitspoelen van zand onder de huizen

Onder de bodem van de kruipruimten bevindt zich veen dat als gevolg van oxidatie op natuurlijke wijze inklinkt. Hierdoor neemt het volume af en neemt de hoogte van de kruipruimte toe.

Wanneer door inklinking een gat ontstaat tussen funderingsbalk en bodem van de kruipruimte kan instromend regenwater zand onder de funderingsbalk wegspoelen. Hierdoor kan een verzakking optreden langs de gevel en wateroverlast in de kruipruimte of in de kelder.

Het oxideren van veen is een natuurlijk proces en heeft geen relatie tot de werkzaamheden aan het kanaal.

7.11 Ongelijke zettingen als gevolg van ingebrachte ankers

Van de onderzochte 29 prioriteitspanden staan er twee op plaatsen waar de wachtplaatsen en boordvoorzieningen zijn aangebracht. Bij het ene prioriteitspand wordt geen schade verwacht door dit mechanisme. Bij het andere prioriteitspand is matige tot ernstige schade door dit mechanisme waarschijnlijk.

7.12 Samenvatting van schadeoorzaken en effecten op de prioriteitspanden

Onderstaande tabel geeft een samenvatting van de schadeoorzaken en de mogelijke relatie met schade aan de prioriteitspanden.

Tabel 7.1 Schadeoorzaken en mogelijke relatie tot de werkzaamheden voor de prioriteitspanden

Schadeoorzaak	Conclusie
Baggeren van de kanaalbodem – ongelijkmatige zakkings van de panden	Voor 3 panden met een strokenfundering is het niet waarschijnlijk dat er een verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade. Als er ter plaatse van de 7 panden met poerenfundering en 10 panden met een onbekend funderingstype is gebaggerd in een droge periode is een relatie tussen het baggeren en de waargenomen schade niet waarschijnlijk. Als ter plaatse van deze panden is gebaggerd in een natte periode is de kans op schade door het baggeren afhankelijk van het funderingstype, de marge tussen de belasting en de draagkracht van de minst draagkrachtige poeren van fundering, de stijging van de grondwaterstand boven een niveau dat nog niet eerder is bereikt, de nabijheid van een vervormde damwand met lekkage en de afstand van het pand tot het kanaal. Het werkelijke belastingniveau en draagvermogen van de poeren en de stijging van de grondwaterstand dienen per pand te worden vastgesteld om in geval van geconstateerde schade de causaliteit vast te stellen.
Baggeren van de kanaalbodem – wateroverlast	Door het baggeren kan bij alle panden in de directe omgeving van het kanaal een kleine stijging van de grondwaterstand zijn voorgekomen gedurende een periode van hooguit enkele dagen. In natte perioden kan deze stijging geleid hebben tot een tijdelijke toename van de wateroverlast.
Trillingen als gevolg van zwaar wegtransport	Het is onwaarschijnlijk dat de trillingsbron "zwaar verkeer" schade veroorzaakt of heeft veroorzaakt. Deze conclusie is gebaseerd op alle waarnemingen tot en met 8 maart 2020.
Trillingen als gevolg van de scheepvaart	Het is onwaarschijnlijk dat de trillingsbron "scheepvaartverkeer" schade veroorzaakt of heeft veroorzaakt. Deze conclusie is gebaseerd op alle waarnemingen tot en met 8 maart 2020.
Disfunctioneren van het sluitmechanisme van de Puntbrug	Combinatie van schademodel en pandopnamen wijst uit dat het disfunctioneren van het sluitingsmechanisme niet heeft geleid tot schade aan de nabijgelegen prioriteitspanden.
Trillingen als gevolg van intrillen van damwanden en ankers in 2011 en 2012	Voor drie prioriteitspanden met trillingsschade zijn trillingen uit damwandinstallatie een waarschijnlijke oorzaak van de schade. Voor drie prioriteitspanden met trillingsschade wijzen de analyses uit dat de schade waarschijnlijk niet is gerelateerd aan trillingen door installatie van de damwanden van het kanaal.
Vervorming van de damwanden van het kanaal	Zie conclusies bij schadeoorzaak 'baggeren van de kanaalbodem – ongelijkmatige zakkings'.
Werkzaamheden aan de parallelwegen langs het kanaal	Het is niet waarschijnlijk dat de zettingen door werkzaamheden aan de parallelwegen schade hebben veroorzaakt aan de fundering van de panden.
Werkzaamheden leidend tot verzakkingen van de kruipruimtevloer en uitspoelen van zand onder de huizen	De verzakking van de kruipruimtevloer is waarschijnlijk het gevolg van het oxideren van veen. Dit is een natuurlijk proces en heeft geen relatie tot de werkzaamheden aan het kanaal.
Ongelijke zettingen als gevolg van ingebrachte ankers	Er zijn twee panden nabij de locaties waar wachtplaatsen en boordvoorzieningen zijn aangebracht. Bij het ene pand wordt geen schade verwacht. Bij het andere pand is matige tot ernstige schade waarschijnlijk.

8 Beoordeling potentiële schade oorzaken gebiedsbreed

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt aangegeven hoe de resultaten van deze studie in een verdere beoordeling van de panden in het gebied buiten de prioriteitspanden kan worden gebruikt.

8.2 Invloed van de baggerwerkzaamheden op ongelijkmatige zettingen

- Voor panden met een strokenfundering is het niet waarschijnlijk dat er een verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade.
- Als er ter plaatse van de panden is gebaggerd in een droge periode is het niet waarschijnlijk dat de grondwaterstand als gevolg van het baggeren is gestegen boven een niveau dat nog niet eerder is bereikt. In dat geval is een relatie tussen het baggeren en de waargenomen schade niet waarschijnlijk.
- Als in de nabijheid van de panden is gebaggerd in een natte periode is de kans op schade door het baggeren afhankelijk van:
 - Het funderingstype (poeren- of strokenfundering).
 - De marge tussen de belasting en de draagkracht van de minst draagkrachtige poeren van fundering.
 - De stijging van de grondwaterstand boven een niveau dat nog niet eerder is bereikt.
 - De nabijheid van een vervormde damwand met lekkage.
 - De afstand van het pand tot het kanaal.
- De marge tussen de belasting en de draagkracht van de minst draagkrachtige poeren van de fundering en de stijging van de grondwaterstand dienen per pand te worden vastgesteld. Het is niet mogelijk om een gebiedsbrede relatie te geven tussen de stijging van de grondwaterstand en de verschilzakking.

8.3 Mogelijke waterschade door baggerwerkzaamheden

Tijdens de baggerwerkzaamheden van 2011 – 2012 kan door het weghalen van de sliblaag op de kanaalbodem in de directe omgeving daarvan een stijging van de grondwaterstand zijn voorgekomen gedurende een periode van hooguit enkele dagen. Overal langs het kanaal waar panden staan, kan dit hebben geleid tot extra natte kruipruimtes en kelders en optrekkend vocht. Als niet in een natte periode werd gebaggerd is het onwaarschijnlijk dat het baggeren heeft geleid tot wateroverlast, tenzij er structureel (elke winter) wateroverlast is.

Een extra stijging van de grondwaterstand zou in de natte winterperiode van 2011 – 2012 ook kunnen hebben geleid tot opbarsten van keldervloeren, schade aan afdichtingen van kruipruimtes en extra zware wateroverlast. Dit kan echter alleen zijn opgetreden in panden als de grondwaterstand bij deze panden hoogtes bereikt heeft die in de jaren daarvoor nog niet eerder bereikt waren. Er zijn geen schademeldingen die wijzen op opbarsten van de keldervloer en schade aan de afdichting van de kruipruimte, gedurende die periode.

8.4 Invloed van trillingen door zwaar wegtransport

Voor de andere panden langs het kanaal Almelo – de Haandrik mag dezelfde conclusie worden verwacht als voor de prioriteitspanden, gezien de vergelijkbare afstand tot de weg (die aan beide zijden aanwezig is) en de vergelijkbare ondergrond.

Op basis van de metingen lijkt het onwaarschijnlijk dat de trillingsbron “zwaar verkeer” schade veroorzaakt of heeft veroorzaakt. Deze conclusie is gebaseerd op alle waarnemingen tot en met 8 maart 2020.

8.5 Trillingen als gevolg van de scheepvaart

Voor de andere panden langs het kanaal Almelo – de Haandrik mag dezelfde conclusie worden verwacht als voor de prioriteitspanden, gezien de vergelijkbare afstand tot het kanaal en de vergelijkbare ondergrond.

Op basis van de metingen lijkt het onwaarschijnlijk dat de trillingsbron “scheepvaartverkeer” zoals in dit onderzoek gedefinieerd schade veroorzaakt of heeft veroorzaakt. Deze conclusie is gebaseerd op alle waarnemingen tot en met 8 maart 2020.

8.6 Disfunctioneren van het sluitmechanisme van de Puntbrug

Indien zich bij andere bruggen over het kanaal Almelo – de Haandrik eenzelfde disfunctioneren van het sluitingsmechanisme heeft voorgedaan als bij de Puntbrug kunnen de mogelijke gevolgen voor de nabije panden in eerste instantie worden bepaald met de aanpak zoals uitgevoerd voor de Puntbrug.

Vanwege de onzekerheid in de aanpak moeten de uitkomsten van de analyse te worden gevalideerd met pandopnamen van de nabije panden, om te toetsen of er trillingsschade is.

Er is geen algemene conclusie te geven voor de overige panden. Metingen ter plaatse, analyse en validatie met pandopnamen zijn nodig om een conclusie te trekken voor specifieke panden.

8.7 Intrillen van damwanden en ankers 2011 en 2012

In 2019 zijn metingen uitgevoerd bij vergelijkbare installatie van damwanden. Uit de metingen is een empirische curve voor de 95% bovengrens van de trillingssnelheid afgeleid. Het blijkt dat de trillingssnelheid bij bebouwing gelegen op een afstand van minder dan 45 m van het kanaal de grenswaarde van de richtlijn overschrijdt. Dit betekent dat er bij deze panden een kans op schade is geweest die varieert van 6% op 10 m afstand tot 1% op 45 m afstand. Pandopnamen zijn noodzakelijk om aan te geven welke panden wel of geen schade hebben ondervonden door de werkzaamheden.

De analyse voor de prioriteitspanden kan worden gebruikt voor een eerste inschatting van het aantal panden dat mogelijk schade heeft opgelopen als gevolg van dit soort werkzaamheden. De uitkomsten van de analyse dienen te worden gevalideerd met pandopnamen van de nabije panden, om te toetsen of er trillingsschade is.

8.8 Invloed van mogelijke damwandvervorming op naburige bebouwing

Indien zich nabij panden in het gebied vervormde damwanden bevinden gelden de conclusies die ook voor de prioriteitspanden gelden.

Het ontstaan van spleten tussen de damwandplanken is plausibel, gezien de grootte van de waargenomen vervormingen. Lekkage door deze spleten kan leiden tot een stijging van de grondwaterstand ter plaatse van de panden. Paragraaf 8.2 geeft conclusies over de gevolgen van deze grondwaterstandverhoging voor ongelijkmatige zettingen van de funderingen van de panden.

De stijging is er zolang het lek niet wordt gedicht. De lekkage zou kunnen optreden waar de betonnen damwand is vervormd.

Andere schademechanismen zijn niet waarschijnlijk.

8.9 Invloed van werkzaamheden aan de parallelwegen langs het kanaal

Werkzaamheden als het vervangen van veen door zand, herprofilering van het wegdek en de aanleg van verkeersdrempels verhogen de belasting op de ondergrond. Dit kan zettingen van de veenlaag veroorzaken. De zettingen op het niveau van de poeren- of strokenfundering ter plaatse van de gevels zijn naar verwachting zodanig klein dat schade door ongelijkmatige zettingen niet waarschijnlijk is.

8.10 Verzakkingen van de kruipruimtevloer en uitspoelen van zand onder de huizen

Onder de bodem van de kruipruimten bevindt zich veen dat als gevolg van oxidatie op natuurlijke wijze inklinkt. Hierdoor neemt het volume af en neemt de hoogte van de kruipruimte toe.

Wanneer door inklinking een gat ontstaat tussen funderingsbalk en bodem van de kruipruimte kan instromend regenwater zand onder de funderingsbalk wegspoelen. Hierdoor kan een verzakking optreden langs de gevel en wateroverlast in de kruipruimte of in de kelder.

Het oxideren van veen is een natuurlijk proces en heeft geen relatie tot de werkzaamheden aan het kanaal.

8.11 Ongelijke zettingen als gevolg van ingebrachte ankers

Het installeren van klpankers onder een poerenfundering kan leiden tot ongelijkmatige zettingen. Ongeveer 50 panden in het gebied staan nabij of in de zakkingstrog van de klpankers. De schadeverwachting voor deze panden is afhankelijk van het type ankers, de precieze locatie van de ankers en het type fundering. Een stroken fundering zal anders reageren op de zakking, maar ook bij dat type is schade als gevolg van het installeren van de ankers niet uit te sluiten. De kans dat daadwerkelijk schade is opgetreden door zakking als gevolg van installatie van deze ankers is reëel, maar dient per pand te worden vastgesteld.

8.12 Samenvatting van schadeoorzaken en effecten op de overige panden in het gebied

Onderstaande tabel geeft een samenvatting van de schadeoorzaken en de mogelijke relatie met schade aan de overige panden in het gebied.

Tabel 8.1 Schadeoorzaken en mogelijke relatie tot de werkzaamheden voor overige panden in het gebied

Schadeoorzaak	Conclusie
Baggeren van de kanaalbodem – ongelijkmatige zakkingen van de panden	Voor panden met een strokenfundering is het niet waarschijnlijk dat er een verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade. Als er ter plaatse van de panden is gebaggerd in een droge periode is een relatie tussen het baggeren en de waargenomen schade niet waarschijnlijk. Als in de nabijheid van de panden is gebaggerd in een natte periode is de kans op schade door het baggeren afhankelijk van het funderingstype, de marge tussen de belasting en de draagkracht van de minst draagkrachtige poeren van fundering, de stijging van de grondwaterstand boven een niveau dat nog niet eerder is bereikt, de nabijheid van een vervormde damwand met lekkage en de afstand van het pand tot het kanaal. De marge tussen de belasting en de draagkracht van de minst draagkrachtige poeren van de fundering en de stijging van de grondwaterstand dienen per pand te worden vastgesteld. Het is niet mogelijk om een gebiedsbrede relatie te geven tussen de stijging van de grondwaterstand en de verschilzakking.
Baggeren van de kanaalbodem – wateroverlast	Door het baggeren kan bij alle panden in de directe omgeving van het kanaal een kleine stijging van de grondwaterstand zijn voorgekomen gedurende een periode van hooguit enkele dagen. In natte perioden kan deze stijging geleid hebben tot een tijdelijke toename van de wateroverlast.
Trillingen als gevolg van zwaar wegtransport	Het is onwaarschijnlijk dat de trillingsbron "zwaar verkeer" schade veroorzaakt of heeft veroorzaakt. Deze conclusie is gebaseerd op alle waarnemingen tot en met 8 maart 2020.
Trillingen als gevolg van de scheepvaart	Het is onwaarschijnlijk dat de trillingsbron "scheepvaartverkeer" schade veroorzaakt of heeft veroorzaakt. Deze conclusie is gebaseerd op alle waarnemingen tot en met 8 maart 2020.
Disfunctioneren van het sluitmechanisme van bruggen	Er is geen algemene conclusie te geven. Metingen ter plaatse, analyse en validatie met pandopnamen zijn nodig om een conclusie te trekken voor specifieke panden.
Trillingen als gevolg van intrillen van damwanden en ankers in 2011 en 2012	Het is te verwachten dat het intrillen van de ankers en damwanden in een aantal panden schade heeft veroorzaakt tot een afstand van 45 m van de werkzaamheden. Conclusies dienen te worden onderbouwd met metingen tijdens de aanleg, vooropnames en pandopnamen achteraf, indien beschikbaar.
Vervorming van de damwanden van het kanaal	Zie conclusies bij schadeoorzaak 'baggeren van de kanaalbodem – ongelijkmatige zakkingen'.
Werkzaamheden aan de parallelwegen langs het kanaal	Het is niet waarschijnlijk dat de zettingen door werkzaamheden aan de parallelwegen schade hebben veroorzaakt aan de fundering van de panden.
Werkzaamheden leidend tot verzakkingen van de kruipruimtevloer en uitspoelen van zand onder de huizen	De verzakking van de kruipruimtevloer is waarschijnlijk het gevolg van het oxideren van veen. Dit is een natuurlijk proces en heeft geen relatie tot de werkzaamheden aan het kanaal.
Ongelijke zettingen als gevolg van ingebrachte ankers	Gebiedsbreed staan ongeveer 50 panden in het invloedsgebied van de klapankers. De kans dat daadwerkelijk schade is opgetreden door zakking als gevolg van installatie van deze ankers is reëel, maar dient per pand te worden vastgesteld.

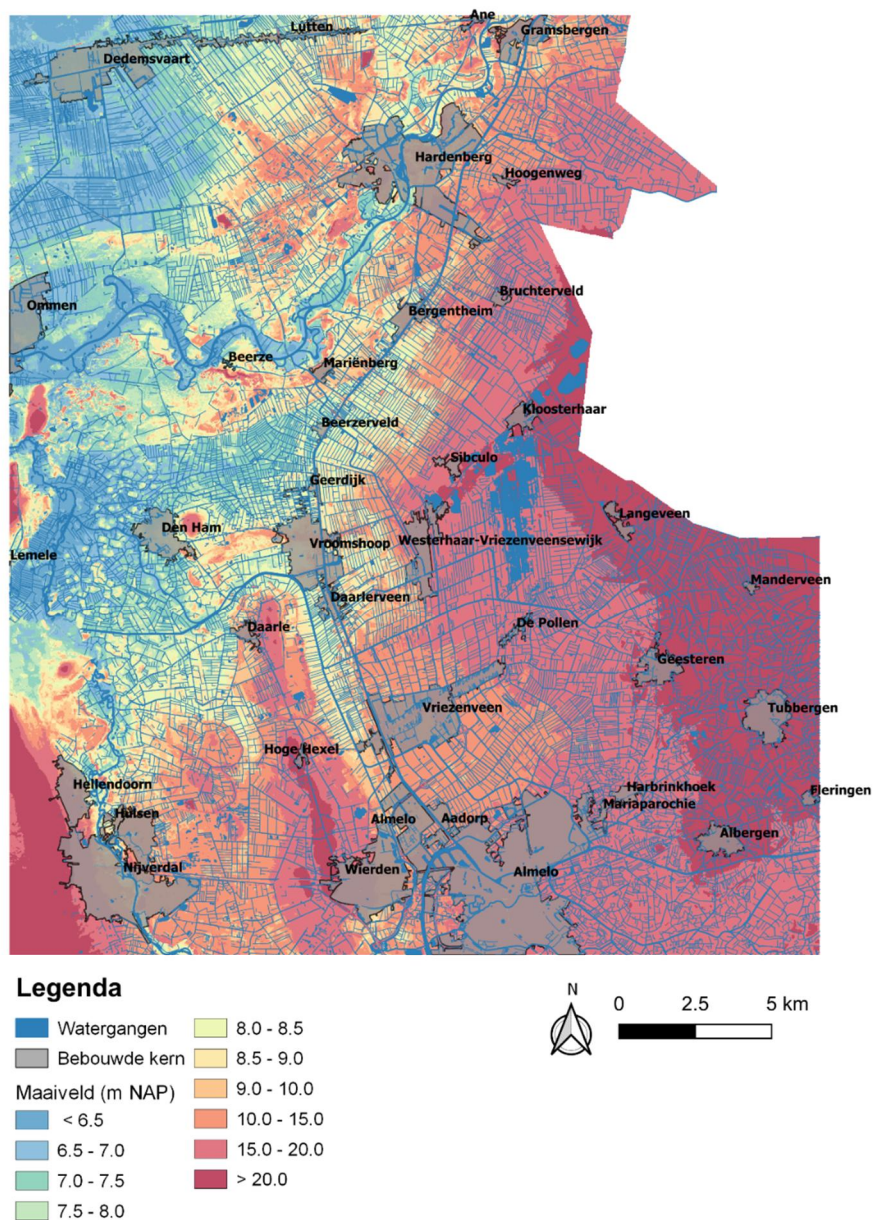
9 Referenties

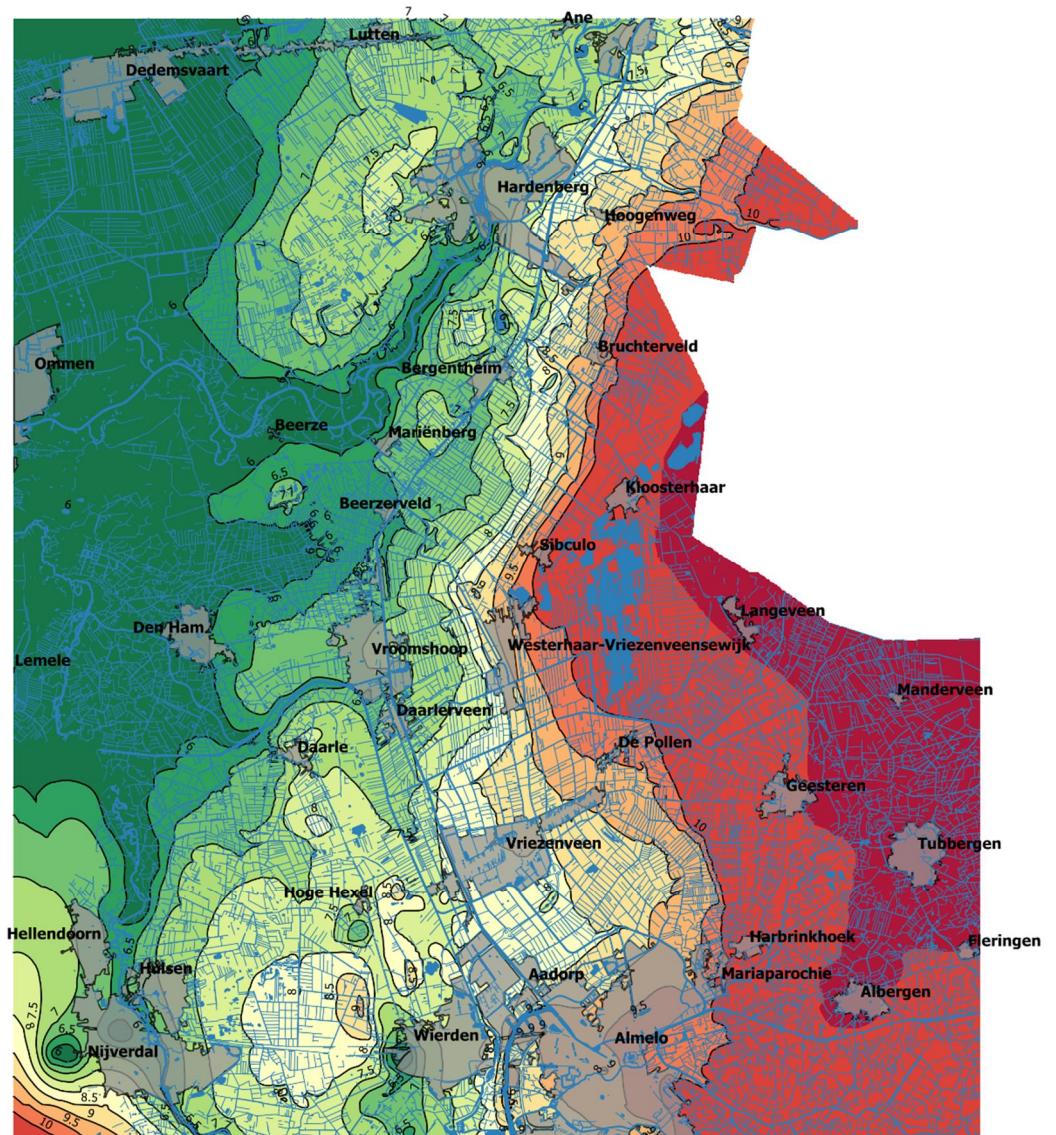
- [1] De Lange (2011). Geohydrologisch Onderzoek peilverhoging IJsseloog, Deltares rapport, 1203847-000.
- [2] Bouma, D. (2019). e-mail van de heer D. Bouma aan de heer M. van der Ruyt (Deltares) van 21 jan 2019.
- [3] CUR (2012). Handboek damwandconstructies. CUR 166, 6^e druk.
- [4] Fugro (2018). Geotechnisch onderzoek, Sonderingen en plaatsen waterspanningsmeters. Rapport 1419-0082-000, versie 1.0, 10 juni 2018. Opgenomen als Bijlage A.
- [5] GEO2 engineering (2019). Zakking als gevolg van het intrillen van damwanden kanaal Almelo - de Haandrik. Rapport 119014.BR01, versie 2, 19 april 2019.
- [6] Movares (2019). Trillingsonderzoek Vroomshoop en Mariëenberg. Rapport D79-OLO-KA-1900004, project RM006774 versie 2.0 26 juli 2019.
- [7] SBR (2017). Trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken.
- [8] SBR (2002). Trillingsrichtlijn B: Hinder voor personen in gebouwen.
- [9] van Nordt, P. (2019). Telefoongesprek de heer P. van Nordt en de heer P. Hölscher (Deltares) op 8 januari 2019.
- [10] Bbci Friwijk, rapport Trillingsprognose, Vervanging oeverconstructie, door Brouwers, J, kenmerk 19-0064T-trillingspredictie v1 van 22-3-2019
- [11] Van Heteren (2018). briefrapport Daarlerveen trillingen, door R. Bollen, kenmerk 118060 van 12 december 2018.
- [12] TU Delft (2013). Vuistregels voor het ontwerpen van een draagconstructie. 20 november 2013. http://wiki.bk.tudelft.nl/mw_bk-wiki/images/1/12/Vuistregels.pdf laatst geraadpleegd 25 februari 2020.
- [13] Deltares (2018). Invloed van bodemdaling door zoutwinning Nedmag op bebouwing en infrastructuur. Deltares rapport 11203195-000-GEO-0002.
- [14] NEN (2017). Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels. Norm NEN 9997-1+C2:2017 nl.
- [15] COB (2012). Aanbevelingen voor het ontwerp van bouwkuipen in stedelijke omgeving. Gouda: COB rapport F530-ER-12-49785
- [16] O'Reilly, M.P. and New, B.M. (1982). Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction. Proc. Tunnelling '82, IMM, London 1982.
- [17] Son, M., Cording, E.J. (2001). Tunneling, building response and damage estimation. Tunnelling Underground Space Technology.
- [18] Talmon, A.M., Mastbergen, D.R. & Huisman, M., 2013. 'Invasion of pressurized clay suspensions into granular soil'. Journal of Porous Media, vol. 16, no. 4, pp. 351-365. <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v16.i4.70>
- [19] NEN (2011). Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren - Grondslagen. Norm NEN 8700:2011 nl.

A Fugro rapportage Geotechnisch onderzoek en plaatsen waterspanningsmeters

Extern bestand: Fugro rapport 1419-0082-000_RAP02.pdf

B Gebiedskarakteristieken: maaiveldhoogte en grondwater



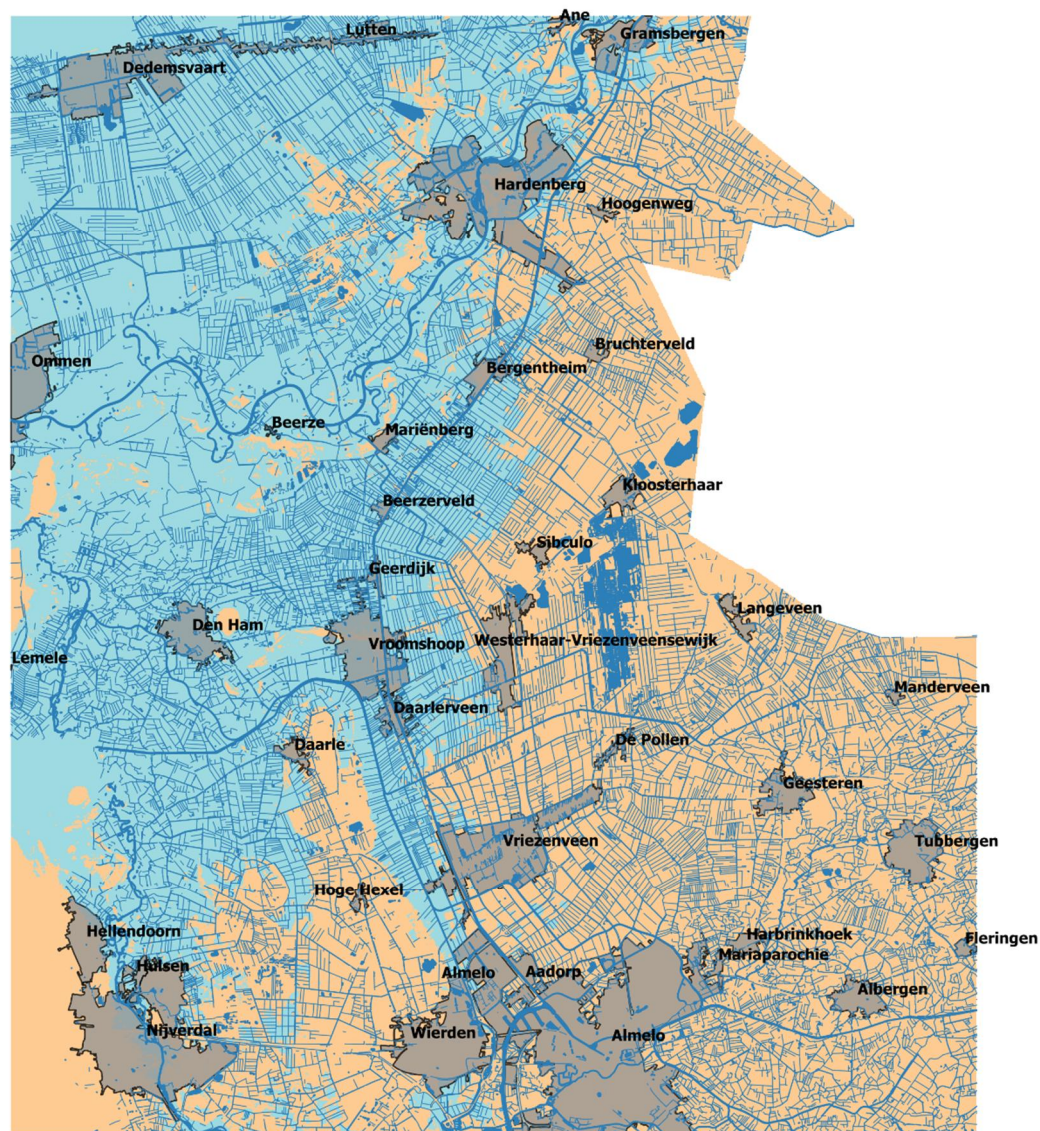


Legenda

 Watergangen	 8.0 - 8.5
 Bebouwde kern	 8.5 - 9.0
Grondwaterstand (m NAP)	 9.0 - 9.5
 < 6.0	 9.5 - 10.0
 6.0 - 6.5	 10.0 - 15.0
 7.0 - 7.5	 > 15.0
 7.0 - 7.5	Isohyphen (m NAP)
 7.5 - 8.0	



0 2.5 5 km



Legenda

- Watergang
- Bebouwde kern

Hoogte maaiveld

- Maaiveld boven kanaalpeil
- Maaiveld beneden kanaalpeil



0 2.5 5 km

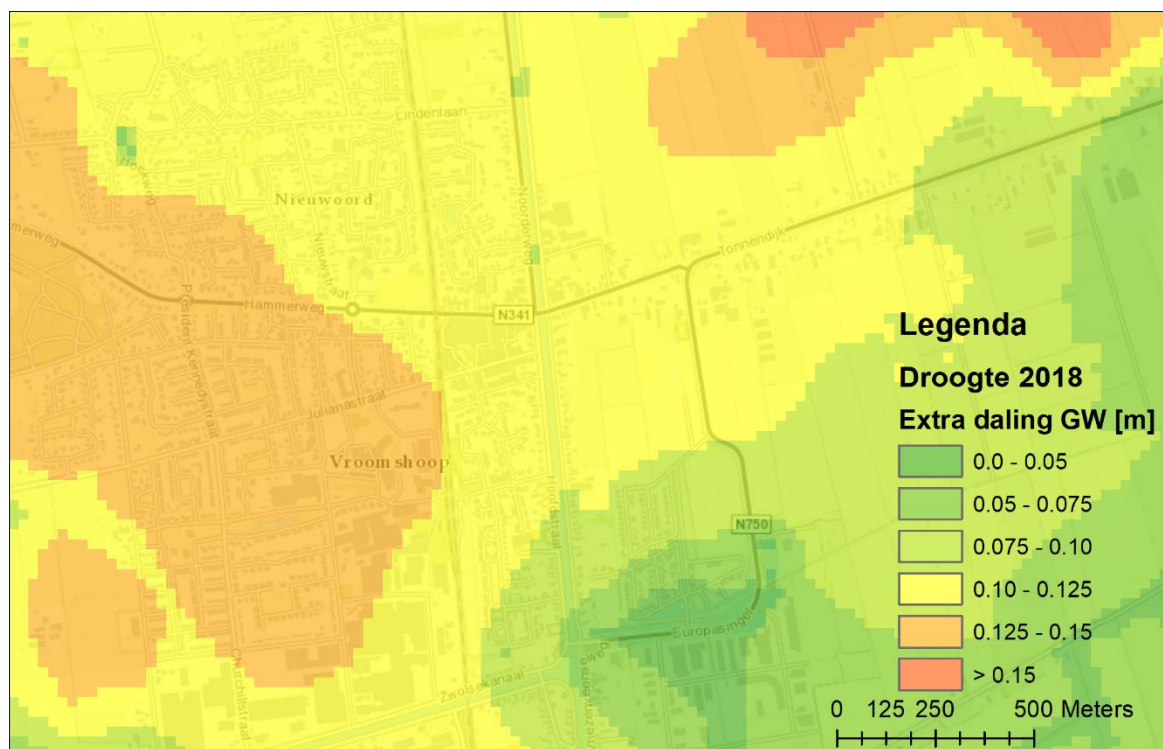


C Analyse van grondwaterstanden zomer 2018

De zomer van 2018 was uitzonderlijk droog voor grote delen van Nederland. Het gebrek aan neerslag heeft tot dieper uitzakkende grondwaterstand geleid. Bij het diep uitzakken van de grondwaterstanden is het mogelijk dat bodemdaling optreedt in slappe lagen zoals veen, silt en klei.

In een dergelijke zomer treedt het uitzakken van grondwaterstanden in dit gebied op regionale schaal op, met relatief kleine variatie op perceelschaal omdat relatief weinig waterhoudende sloten en vaarten voorkomen. De infiltratie uit het kanaal zou in dit geval voor demping van de verlaging zorgen.

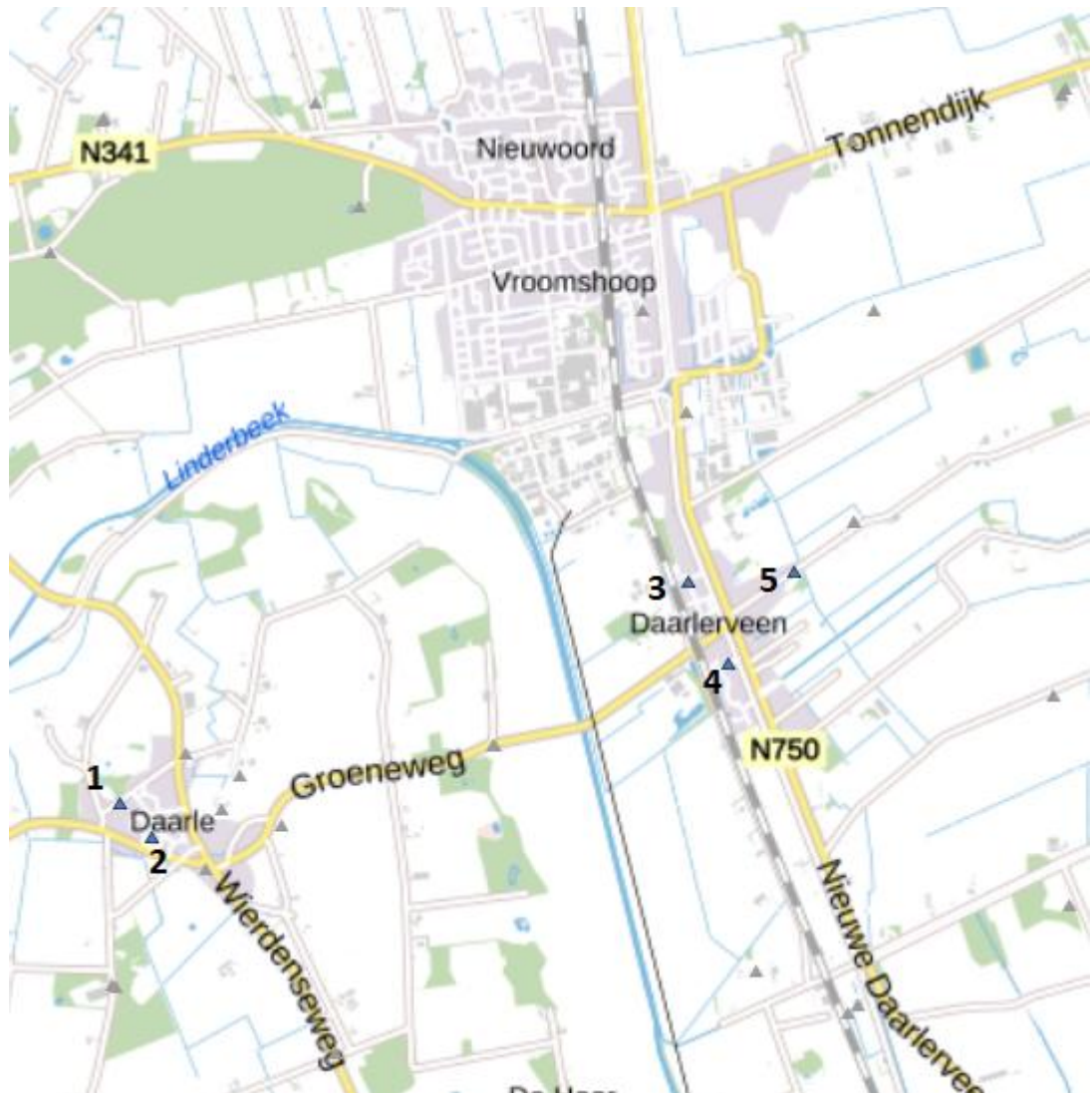
Met het MIPWA uitsnede model is de daling van de grondwaterstand in 2018 ten opzichte van de gemiddelde daling in de zomer berekend (Figuur bijlage C.1). Vooral de grondwaterstand onder het wat hoger gelegen Vroomshoop daalde sterk met grondwaterstanden die 10 tot 15 cm lager zijn dan een typische zomer en vergelijkbaar met droge zomer van 2003. Dit is hoogstwaarschijnlijk sterk gerelateerd aan het ontbreken van watervoerende sloten in het "oranje" gebied in Figuur bijlage C.1, dat het verschil verklaart met de "groene" gebieden in de figuur waarin een vaart zichtbaar voor significante demping van de verlaging zorgt.



Figuur bijlage C.1 Maximale daling van het bovenste grondwater in de zomer van 2018 ten opzichte van de maximale daling in een gemiddelde zomer

Helaas zijn er in het gebied rondom Vroomshoop weinig peilbuizen waarvan de metingen doorlopen tot in 2018 (Figuur bijlage C.2). De metingen van vijf peilbuizen staan onderstaand afgebeeld. Voor deze peilbuizen geldt ook dat de gemeten periode slechts enkele jaren beslaat, vanaf 2015, waardoor de metingen slechts in beperkte mate in historische context geplaatst kunnen worden. De metingen van peilbuis 2 en 3 laten voor de zomer van 2018

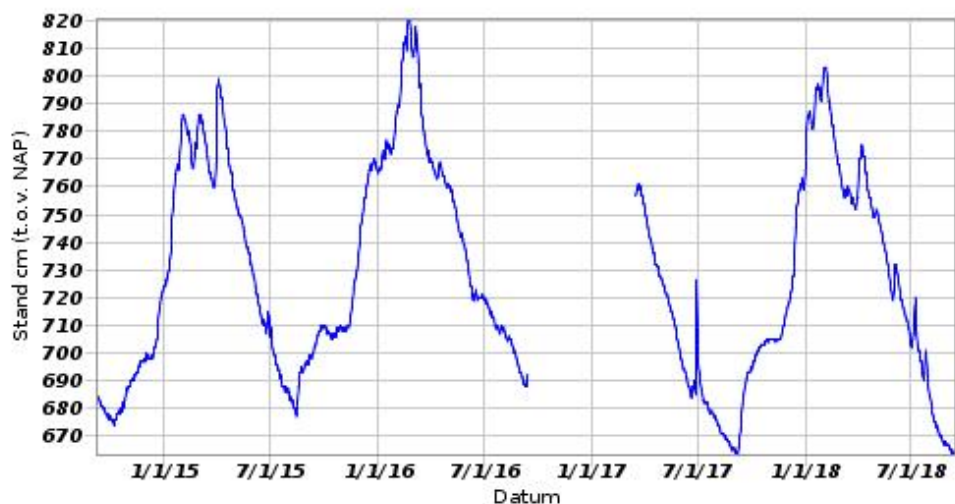
grondwaterstanden zien die circa 10 cm onder die van 2016 en 2017 liggen. Het is aannemelijk dat de zomergrondwaterstand voor 2018 regionaal iets dieper lag dan gebruikelijk.



Figuur bijlage C.2 Locatie peilbuizen Dinoloket, genummerd 1 t/m 5

Grondwaterstanden

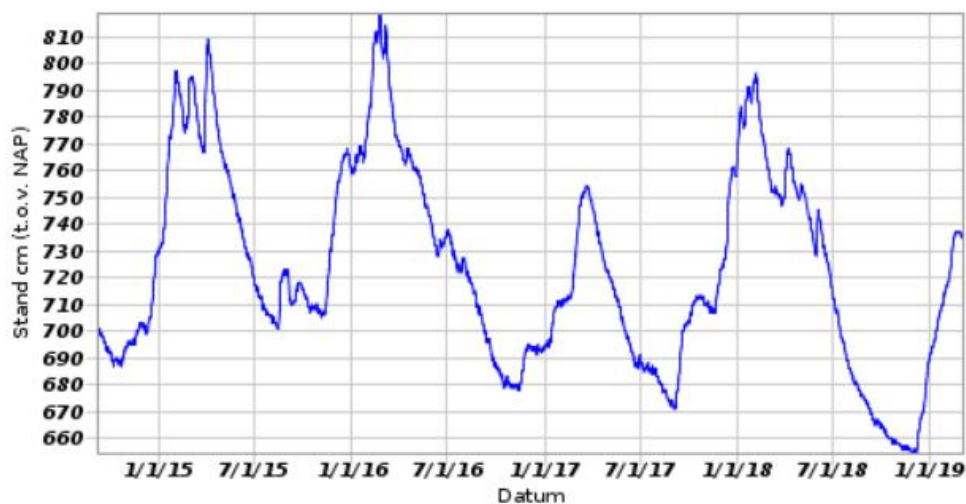
Identificatie: B28B1477
 Identificatie buis: B28B1477001
 Coördinaten: 232882, 494711 (RD)
 Maaiveld: 9.11 m t.o.v. NAP



1 Daalre

Grondwaterstanden

Identificatie: B28B1506
 Identificatie buis: B28B1506001
 Coördinaten: 233043, 494539 (RD)
 Maaiveld: 9.48 m t.o.v. NAP

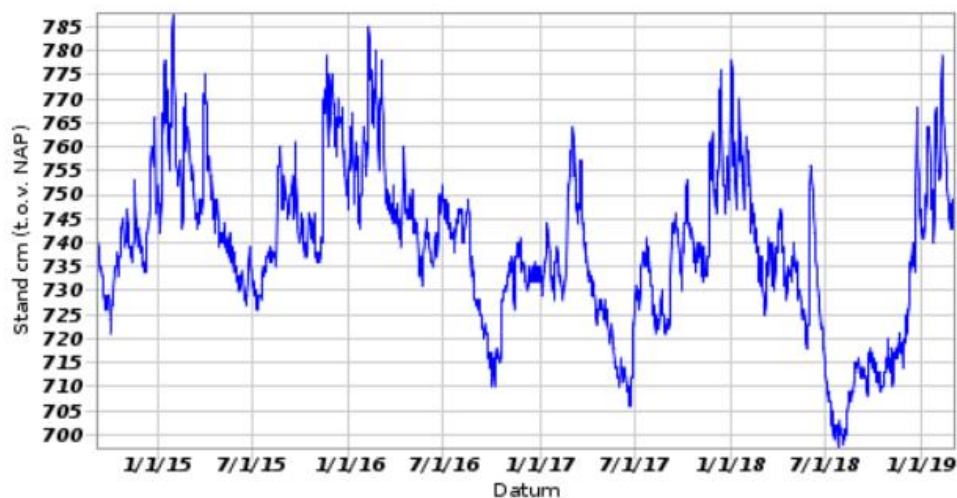


2 Daalre

Grondwaterstanden



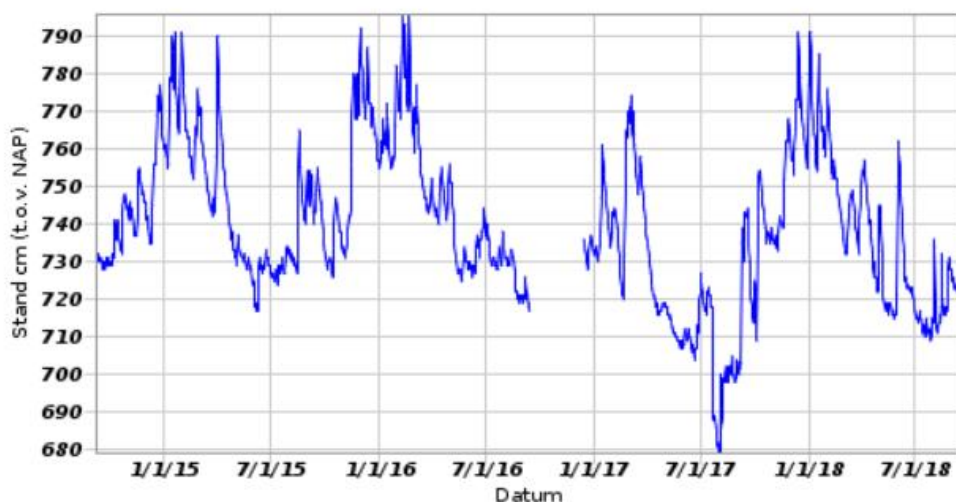
Identificatie: B28B1508
Identificatie buis: B28B1508001
Coördinaten: 235772, 495835 (RD)
Maaiveld: 9.15 m t.o.v. NAP



3 Vroomshoop

Grondwaterstanden

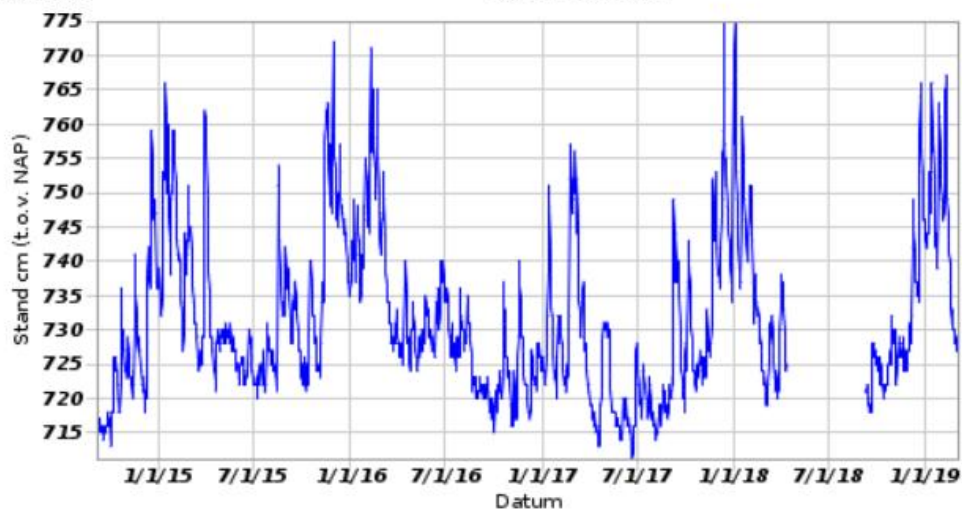
Identificatie: B28B1507
Identificatie buis: B28B1507001
Coördinaten: 235984, 495418 (RD)
Maaiveld: 8.3 m t.o.v. NAP



4 Vroomshoop. De diepte grondwaterstanden in juli 2017 zijn hoogstwaarschijnlijk een meetfout.

Grondwaterstanden

Identificatie: B28B1478
Identificatie buis: B28B1478001
Coördinaten: 236313, 495884 (RD)
Maaiveld: 8.62 m t.o.v. NAP



5 Vroomshoop. De zomerperiode van 2018 ontbreekt.

Figuur bijlage C.3 Metingen in peilbuizen in Figuur bijlage C.2 genummerd 1 tot en met 5

D Resultaten versnellingen prioriteitspand

Deze bijlage geeft voor alle signalen de gemeten versnellingen. Op de horizontale as staat de tijd. De gegevens zijn in intervallen van 30 minuten = 1800 sec opgeslagen.

Extern bestand: Appendices_ruwe data prioriteitspand.pdf.

E Resultaten geselecteerde gebeurtenissen prioriteitspand

E.1 Toelichting op de presentatie

Er is getracht om de signalen op één pagina samen te vatten voor alle gebeurtenissen. Dit heeft geleid tot het volgende schema:

Snelheden [mm/s]	Snelheden [mm/s]	Waterspanningen [kPa]
voorgevel verticaal (4, 7)	voorgevel verticaal (10,13)	kanaal en berm (19, 20)
voorgevel loodrecht (5, 8)	voorgevel loodrecht (11,14)	berm fietspad (21, 22)
voorgevel evenwijdig (6, 9)	voorgevel evenwijdig (12)	voortuin zuid (23, 24)
achtertuin verticaal (1)	kelder verticaal (15, 17)	voortuin noord (25, 26)
achtertuin loodrecht (2)	kelder horizontaal (16, 18)	achtergevel (27,28)
achtertuin evenwijdig (3)		achtertuin (29)

Tabel bijlage E.1 Lay-out van de algemene figuren (op A3-format: 3 kolommen in de breedte, 6 rijen in de hoogte).

De eerste lijn is getekend in blauw, de tweede lijn is in zwart er overheen getekend (excuses aan hen die slecht kleuren zien). De volledige gemeten versnellingssignalen en waterspanningen zijn opgenomen in appendix D.

Op al deze figuren is horizontaal de tijd-as in seconden (Tijd[s]) en verticaal in de twee linker kolommen de trillingssnelheid in mm/s (Snelheid [mm/s]) en in de rechter kolom de waterdruk in hPa hectopascal (Waterdruk [hPa]). De Pascal is een maat voor de druk. Een waterkolom van 1 m hoogte weegt 1000 kg (of te wel 10 000 N) en geeft een druk van 10 000 Pa, meestal wordt dit geschreven als 10 kPa. Een waterstandsverhoging van 1 cm geeft een drukverhoging van 100 Pa = 1hPa. hPa is de eenheid die bij het KNMI vaak wordt gebruikt.

Elk signaal wordt op twee pagina's gepresenteerd. De eerste pagina (met laatste letter T van tijd) geeft het signaal in de tijd weer. Op de volgende pagina (met laatste letter F van Frequentie) staan dezelfde signalen afgebeeld in het frequentiedomein. Deze uitwerking is niet genormeerd op de lengte van de tijdsignalen, zodat de grootte van de getallen niet mogen worden vergeleken. Het gaat om de karakteristiek: welke frequenties spelen een rol.

E.2 Toelichting op de ruis in de meting

De signalen die zijn gemeten zijn erg klein. Daardoor komen de signalen in een aantal gevallen nauwelijks boven het ruisniveau van de opnemer en de versterkers uit. Ruis is meestal witte ruis, dat in het frequentiedomein een min of meer constante waarde heeft. Dit type ruis is zichtbaar in de frequentie-figuren van de waterspanningsmeters.

Er treedt ook witte ruis op in de versnellingsopnemers. Maar omdat de versnellingen zijn geïntegreerd om de snelheden weer te geven, verandert het karakter van de ruis. Door de integratie wordt de frequentiekarakteristiek aangepast in de vorm van 1/frequentie. In de gepresenteerde snelheid als functie van de frequentie is voor de verder weg liggende opnemers deze vorm goed zichtbaar. Als er een zwaar voertuig passeert tijdens de meting van een scheepspassage wordt dit beeld verstoort.

Extern bestand: BIJLAGE E Geselecteerde events prioriteitspand.pdf

F Informatie over trillingsopnemers en trillingsmetingen

F.1 Type opnemers

Een versnellingsopnemer meet de versnelling van het object waaraan deze is bevestigd. De eenheid is m/s^2 . Versnellingen worden in één richting gemeten, dus er bestaan in een meetpunt drie onderling loodrechte versnellingen. De trillingsmetingen door Deltares zijn uitgevoerd met versnellingsopnemers.

Een Turboconus van Deltares is een speciale wegdrukbare conus om trillingen dieper in de grond te kunnen meten. In deze conus zijn drie versnellingsopnemers gemonteerd.

Trillingen kunnen ook worden gemeten met geofoons. Een geofoon meet de trillingsnelheid van het object waarop deze is bevestigd. De eenheid is m/s of mm/s . Trillingsnelheden worden in één richting gemeten, dus er bestaan in een meetpunt drie onderling loodrechte s. De meetapparatuur die gedurende langere tijd de trillingen meet bevatten meestal geofoons. De metingen die door Movares zijn uitgevoerd (zie hoofdstuk 5.5 en hoofdstuk 5.6) en de trillingsmonitoring die aan een prioriteitspand is uitgevoerd (zie hoofdstuk 5.8) zijn met dit geofoons uitgevoerd

Trillingssnelheden worden meestal snelheden genoemd. Deze snelheid varieert snel in de tijd en geeft aan hoe snel een object (maximaal) beweegt tijdens de trilling. Als er aan deze snelheid een waarde wordt toegekend is dit meestal de maximale waarde die tijdens een trilling optreedt (de amplitude van de trillingssnelheid)

In de dynamica spelen verschillende snelheden een rol:

- De trillingssnelheid geeft aan hoe snel een object maximaal beweegt (meestal in de orde van mm/s).
- De golfsnelheid geeft aan hoe snel een verstoring zich door een materiaal voortplant (meestal in de orde van $100\text{-}1000 \text{ m/s}$).
- De rijsnelheid of vaarsnelheid geeft aan hoe snel een object zich door de ruimte beweegt (in dit rapport meestal in de orde van $5 - 60 \text{ km/uur} = 1 - 20 \text{ m/s}$).

F.2 Hoe de signalen worden verwerkt

Versnellingen en snelheden zijn in wezen twee verschillende beschrijvingen van hetzelfde signaal in de tijd. Versnellingen kunnen worden geïntegreerd tot snelheden, het differentiëren van snelheden geeft versnellingen. Integratie van snelheid van een object geeft de verplaatsing van het object als functie van de tijd.

Een trilling kan worden opgevat als de sommatie van een aantal sinussen in de tijd. Dit is de basis van de Fourier transformatie naar het frequentie domein. Een signaal in het frequentie domein is in wezen hetzelfde signaal, maar voor een aantal problemen een veel handigere manier van kijken. Het signaal in het frequentie domein geeft als het ware een karakteristiek van het signaal. Bij de situatie van trillingshinder en schade worden de trillingen die gegenereerd worden door de bron, getransporteerd door de bodem en de constructie delen van het gebouw. Door de karakteristiek van de trilling op verschillende plaatsen te bekijken kan informatie over de eigenschappen van de delen er tussen worden afgeleid.

Voor het beoordelen van de kans op schade is volgens de SBR-richtlijnen de maximale waarde van de snelheid maatgevend. Het maakt wel uit hoe vaak deze maximale waarde voorkomt, dat is opgenomen in een partiële factor voor het type trilling. Een trilling die eenmalig is (bijvoorbeeld noodstop van een machine) mag hoger zijn dan een trilling die herhaald voorkomt (bijvoorbeeld een bus die langsrijdt) of een trilling die continu optreedt (bijvoorbeeld een continu draaiende machine).

Voor het beoordelen van de kans op hinder wordt de gemeten snelheid verwerkt tot een effectieve waarde met daarin weging voor gevoeligheid mensen voor verschillende frequenties. Tevens wordt een zogenaamde periodieke waarde voor herhaald voorkomende trillingen bepaald. Voor hinder is in feite de grens afhankelijk van het aantal keer dat een voelbare trilling voorkomt: een trilling die bijvoorbeeld één maal per week voorkomt mag hoger zijn dan een trilling vaak voorkomt (bijvoorbeeld elk uur).

F.3 Kalibratie van de opnemers

De resultaten van een meting staan in Volts, de eenheid waarin de elektronica werkt. Om na te gaan of de opnemers correct werken worden deze voor de meting statisch gekalibreerd, door de versnelling van de zwaartekracht (g) te meten. Voor elke opnemer is de waarde bij benadering bekend, voor de omrekening van Volt naar m/s^2 wordt het gemeten aantal volts per $g = 9.81 m/s^2$ gebruikt. Deze waarden verschillen per opnemer, maar zijn in orde van grootte per type opnemer redelijk constant.

Na installatie zijn de opnemers nogmaals statisch bekeken, zodat bekend is dat de opnemers die als verticaal zijn genoteerd ook daadwerkelijk verticaal staan.

G Extreme waarden voor gebeurtenissen

De tabel in deze bijlage geeft de maximale trillingssnelheid weer die in elke signaal voor elke gebeurtenis is gevonden.

In de kolom van signaal 17 is tijdens de passages S06 tot en met S09 een hoog trillingsniveau geconstateerd. Het betreft één van de twee verticale opnemers in de kelder. Het lijkt zeer onwaarschijnlijk dat dit trillingen zijn die door de passerende boten zijn veroorzaakt.

Na de passage van schip 6 op 19 juni (gebeurtenis S06) treden plotseling enkele hoge pieken op. Deze zijn ook zichtbaar tijdens de passages S07 en S08. De trillingen worden in geen enkele andere opnemer opgemeten, waar de signalen een factor 100 kleiner blijven.

Tijdens de passage S09 is het beeld veranderd: hier is sprake van een min of meer stationair signaal met frequentie van ongeveer 2 Hz. Een 2 Hz signaal is ook zichtbaar in de water-spanningsopnemers tussen het kanaal en het pand, maar niet onder het pand of in het kanaal.

Signaal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
afst [m]	34	34	34	21	21	21	21	21	21	22	22	22	22	22	26	26	26	26
richting	V	L	E	V	L	E	V	L	E	V	L	E	V	L	V	L	V	L
schepen																		
S01 (1)	0,08	0,05	0,04	0,12	0,07	0,06	0,14	0,07	0,05	0,13	0,07	0,07	0,15	0,08	0,13	0,05	0,09	0,07
S02	0,03	0,03	0,03	0,09	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,08	0,04	0,03	0,09	0,04	0,05	0,03	0,05	0,03
S03	0,03	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,06	0,03	0,02	0,04	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02
S04	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,05	0,02	0,03	0,02
S05	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02
S06	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	3,50	0,02
S07	0,05	0,02	0,02	0,06	0,03	0,03	0,06	0,03	0,02	0,07	0,04	0,03	0,06	0,05	0,05	0,03	3,17	0,03
S08	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	3,88	0,02
S09	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03	0,02	0,03	0,51	0,03
S10	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,05	0,03	0,02	0,06	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
vracht-wagens																		
V01	0,07	0,05	0,05	0,22	0,07	0,05	0,17	0,07	0,07	0,21	0,07	0,12	0,19	0,08	0,08	0,05	0,10	0,06
V02	0,05	0,04	0,04	0,08	0,05	0,04	0,07	0,06	0,04	0,09	0,05	0,06	0,08	0,07	0,05	0,06	0,06	0,05
V03	0,10	0,08	0,05	0,22	0,08	0,10	0,13	0,09	0,07	0,21	0,11	0,13	0,19	0,12	0,11	0,10	0,12	0,09

Signaal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
V04	0,11	0,07	0,07	0,20	0,10	0,10	0,15	0,08	0,10	0,21	0,10	0,13	0,19	0,13	0,11	0,08	0,13	0,09
V05	0,18	0,08	0,10	0,31	0,10	0,10	0,25	0,07	0,12	0,36	0,07	0,18	0,27	0,10	0,19	0,09	0,21	0,09
V06	0,14	0,10	0,12	0,26	0,17	0,11	0,22	0,10	0,11	0,32	0,13	0,21	0,28	0,15	0,20	0,08	0,16	0,11
V07	0,13	0,09	0,06	0,29	0,11	0,16	0,24	0,13	0,10	0,25	0,13	0,17	0,36	0,21	0,17	0,11	0,18	0,13
V08	0,07	0,06	0,04	0,12	0,11	0,06	0,09	0,05	0,09	0,16	0,06	0,10	0,11	0,08	0,08	0,07	0,08	0,06
V09	0,08	0,04	0,04	0,15	0,07	0,06	0,11	0,05	0,07	0,19	0,08	0,09	0,16	0,09	0,09	0,05	0,09	0,06

Signaal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
trekkers																		
T01	0,03	0,02	0,03	0,05	0,04	0,07	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03
T02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04	0,02	0,03	0,03
T03	0,02	0,02	0,02	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
T04	0,03	0,03	0,03	0,06	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03	0,07	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04	0,03	0,05	0,05
T05	0,03	0,02	0,02	0,06	0,04	0,05	0,05	0,03	0,03	0,05	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
T06	0,10	0,08	0,05	0,22	0,08	0,10	0,13	0,09	0,07	0,21	0,11	0,13	0,19	0,12	0,11	0,10	0,12	0,09
T07	0,05	0,02	0,02	0,06	0,04	0,04	0,06	0,03	0,03	0,07	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03
T08	0,03	0,02	0,03	0,06	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04	0,07	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03
T09	0,18	0,08	0,10	0,31	0,10	0,10	0,25	0,07	0,12	0,36	0,07	0,18	0,27	0,10	0,19	0,09	0,21	0,09
T10	0,03	0,02	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,05	0,04	0,02	0,06	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03
T11	0,05	0,04	0,03	0,11	0,04	0,05	0,10	0,05	0,04	0,12	0,06	0,06	0,09	0,08	0,06	0,07	0,05	0,07
T12	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02

Tabel bijlage G.1 Maximale trillingssnelheden in de signalen bij verschillende types gebeurtenissen de kolommen zijn genummerd, dit is de signaal indicator die toegelicht wordt in Tabel 5.4. De tabel geeft de maximale trillingssnelheid in de eenheid mm/s. Verticaal staan de beschouwde gebeurtenissen. Deze zijn beschreven in Tabel 5.5 (schepen), Tabel 5.7 (trekkers) en Tabel 5.6 (vrachtwagens).

noot (1) deze maxima worden bepaald door de passage van de vrachtwagen in het begin van de meting

H Trillingen door valgewichtproeven en brugsluitingen

Tijdens de metingen zijn drie proeven uitgevoerd: valgewicht proeven, brugsluitingen en rijproeven met een trekker met aanhanger en een zeer zware vrachtwagen. De valgewichtproeven en brugsluitingen zijn door tegenslag tegelijkertijd uitgevoerd. Deze worden uiteen gerafeld in de eerste paragraaf van deze bijlage. Daarna worden de meetsignalen van de brugopeningen en de valgewichtproeven getoond. Tenslotte wordt de theoretische achtergrond van het model voor het opschalen van de brugsluitingen uitgewerkt.

H.1 Synchronisatie van de signalen

De eerste stap is de verschillende gebeurtenissen tijdens de bemande meting te koppelen aan de verhoogde trillingsniveaus in de trillingsmeting. Er zijn twee metingen: de trillingsmeting in de kelder van de brug en de geluidsopname in de kelder. De geluidsopname is vrij zacht, maar met het programma Audicity zijn de tijdstippen met een duidelijke bron goed waarneembaar en hoorbaar te maken. De drie brugopeningen zijn duidelijk herkenbaar omdat de motoren relatief veel geluid geven.

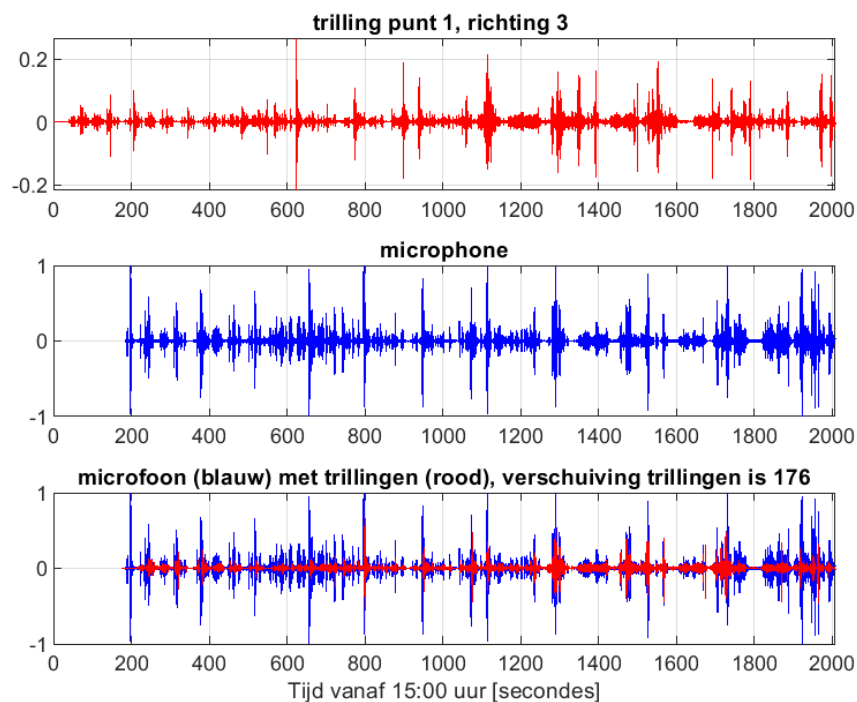
De geluidsopnames zijn afgeluisterd. In Tabel bijlage H.1 is in de kolom "tijd (relatief)" aangegeven wanneer de motoren starten en wanneer het brugdek hoorbaar de fundering raakt. Dit geeft aan dat de tijdsverschuiving tussen de microfoon en de genoteerde tijden orde 3 minuten is: de passagetijd in de microfoon is 3 minuten na de genoteerde tijd.

Tabel bijlage H.1 Tijdstippen brugopeningen op basis van de microfoon

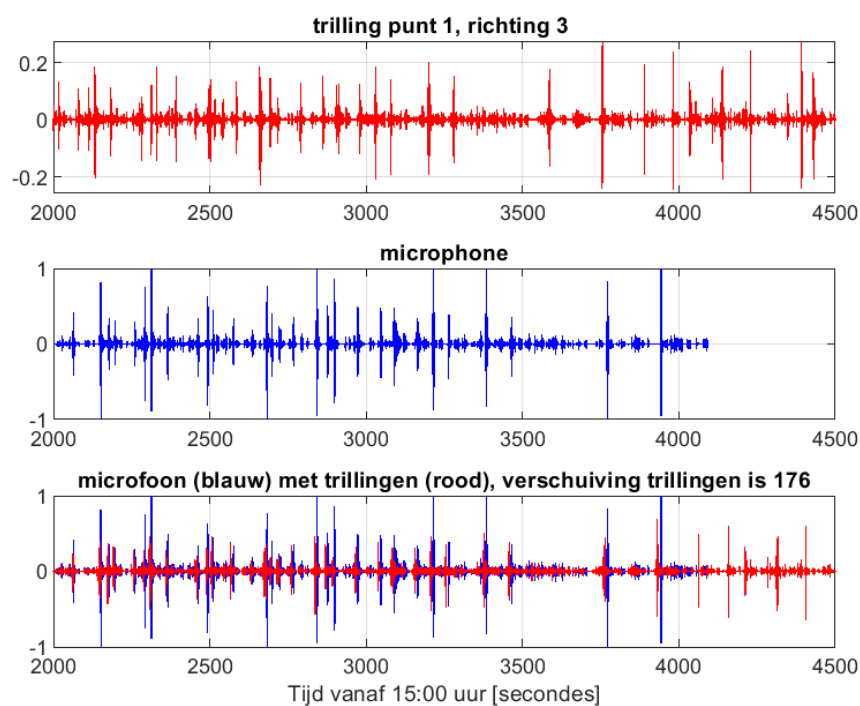
Opening	Genoteerd	Opname	Tijd (relatief)	Starttijd	Shift	Sluittijd
1	15:19	45	2:00-3:15	15:22:27	3:27	15:23:42
2	15:24	46	1:59-3:00	15:26:46	2:46	15:27:47
3	15:27	47	1:15-2:18	15:30:23	3:23	15:51:26

De geluidsopnames en de trillingen in de kelder zijn ook vergeleken. In Figuur bijlage H.1 staat het resultaat voor de eerste 2000 s van de meting. De bovenste figuur is de trillingsmeting, de middelste figuur de geluidsopname en de onderste figuur toont beide signalen, waarbij de trillingsmeting met een factor 2,5 is vermenigvuldigd en met 176 s naar rechts is verschoven. Hier blijkt de synchronisatie goed te kloppen, bij een onderling verschuiving van 176 s (trillingen schuiven dus bijna 3 minuten naar achteren). Figuur bijlage H.2 en Figuur bijlage H.3 tonen het volgende deel van de metingen. Deze figuren laten zien dat later de synchronisatie verloopt, tot een verschuiving van ongeveer 17 s.

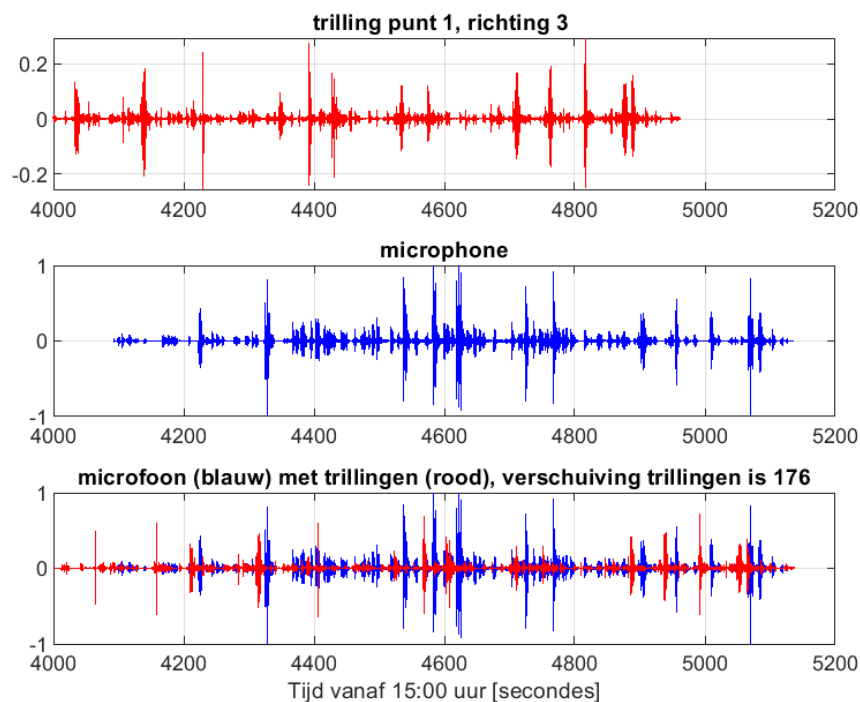
Deze figuren hebben geen eenheid op de verticale as, het gaat om de tijdssynchronisatie. De trillingssnelheid is met 2,5 vermenigvuldigd om een signaal te krijgen dat goed zichtbaar is bij het microfoon signaal, dat op 1,0 is genormeerd.



Figuur bijlage H.1 Synchronisatie trillingen en geluidsopname, deel 1 (geen eenheid op verticale as)



Figuur bijlage H.2 Synchronisatie trillingen en geluidsopname, deel 2 (geen eenheid op verticale as)



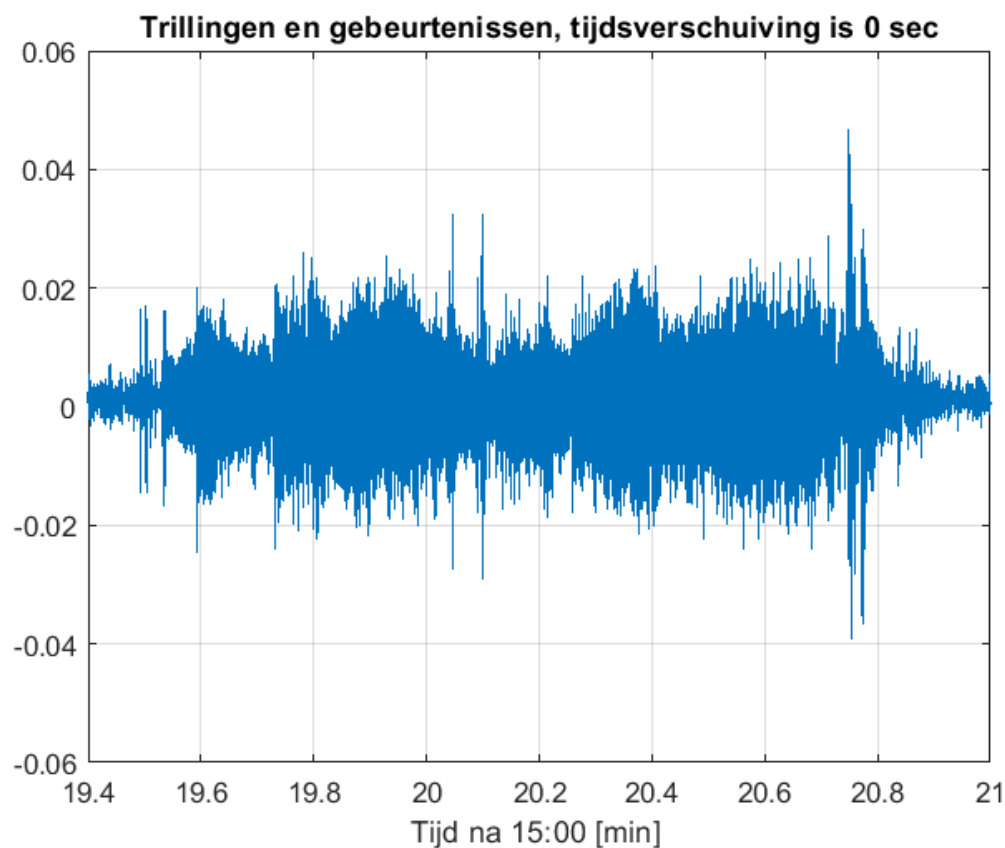
Figuur bijlage H.3 Synchronisatie trillingen en geluidsoptname, deel 3 (geen eenheid op verticale as)

In het vervolg wordt de tijdbasis van de trillingsmeting als algemene basis gekozen. Om de gebeurtenissen in het audiobestand te kunnen beoordelen moet het tijdstip 3 minuten eerder worden gezocht. Om de handnotaties van de gebeurtenissen te vinden in de audio bestanden moeten deze ongeveer 3 minuten naar achteren worden geschoven. Omdat de audio bestanden weer 176 sec (is ongeveer 3 minuten) verschillen van de trillingsmetingen, wordt geconcludeerd dat de aantekeningen en de trillingsmetingen redelijk zijn gesynchroniseerd. Hierbij wel rekening houden dat hierbij geen secondes zijn genoteerd en het moment van de werkelijke dynamische gebeurtenis niet exact bekend is.

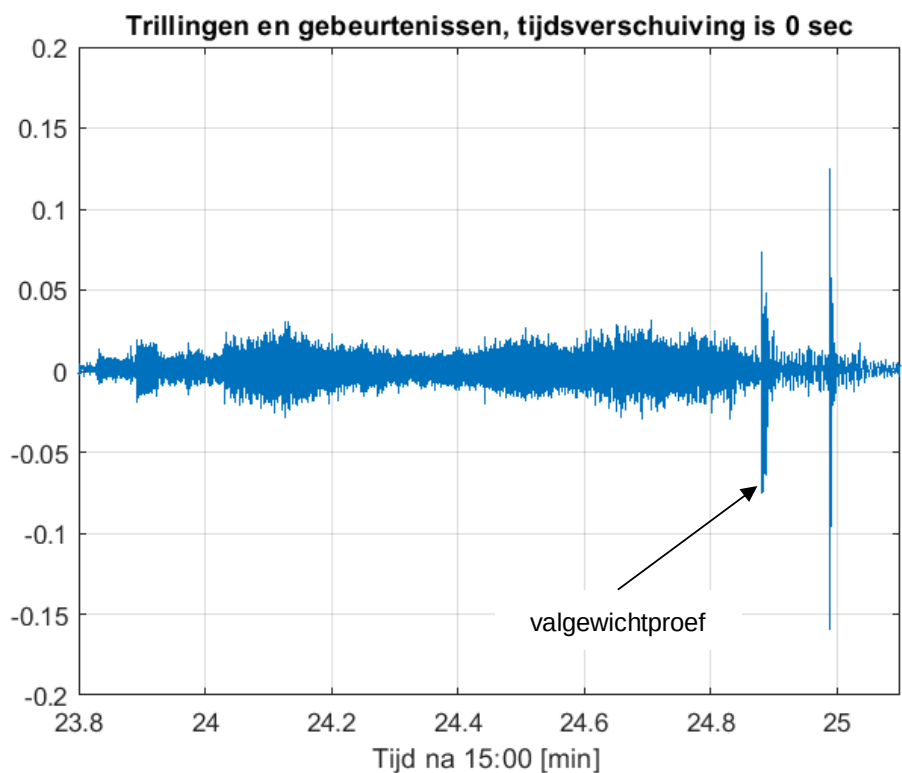
H.2 Meetresultaten van de brugsluitingen

Er zijn drie extra brugopeningen uitgevoerd. Hierbij is de brug steeds gedeeltelijk geopend, en weer neergelaten. De gewone procedure is uitgevoerd. Figuur bijlage H.4, Figuur bijlage H.5 en Figuur bijlage H.6 geven de grootste component van de trilling in de kelder weer (richting 3 is verticaal). In deze figuren is de tijd in minuten gezet, waarbij het decimale systeem is gebruikt, dus $28.2 = 28 \text{ min en } 12 \text{ sec}$ (in tijdsnotatie ook $28:12 = 15:28:12$).

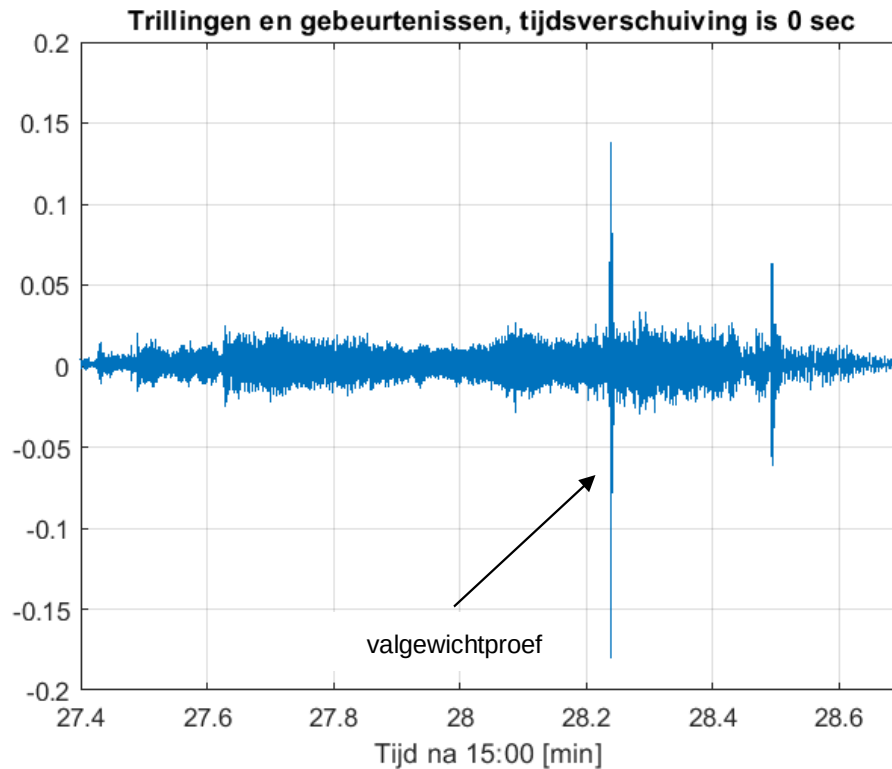
Aan het einde van de brugopening is een iets grotere trilling zichtbaar. Dit is vermoedelijk de sluitklap van het brugdek. De andere grote pieken zijn de valgewicht belastingen aan de zijde van het appartementengebouw A. Daarvan is het tijdstip niet genoteerd, omdat de notulist aan de zijde van de bediening stond, dus de oostzijde van het kanaal. De klappen van het sluiten van de brug zijn dan zichtbaar op tijdstip $15:20:45$, $15:24:53$ en $15:28:30$.



Figuur bijlage H.4 Trilling in kelder bij eerste extra opening (15:19:30-15:20:55)



Figuur bijlage H.5 Trilling in kelder bij tweede extra opening (15:23:50-15:25:04). De laatste grote piek is als een valgewicht klap1 van serie 1 geïdentificeerd



Figuur bijlage H.6 Trilling in kelder bij derde extra opening (15:27:24-15:28:30). De grote trilling op minuut 28.24 is de valgewichtproef 3 in serie 1 op 15:28:14

Tabel bijlage H.1 geeft alle tijdstippen gerelateerd aan de brugopeningen op basis van de trillingsmetingen.

Tabel bijlage H.2 Tijdstippen brugsluitingen

Opening	Start	Sluiting	Einde	Valgewicht
1	15:19:30	15:20:45	15:21:00	
2	15:23:50	15:24:53	15:25:02	15:24:59
3	15:27:24	15:28:30	15:28:30	15:28:14

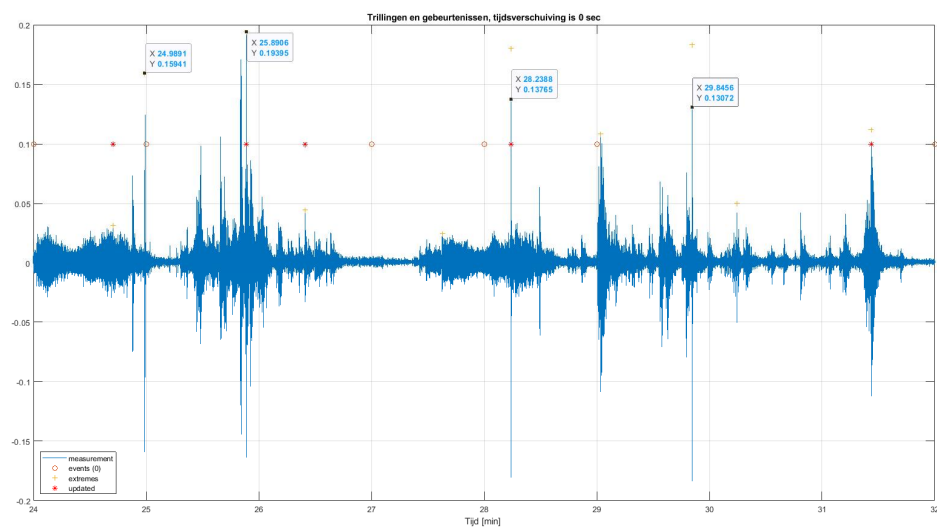
H.3 Meetresultaten van de valgewicht proeven

De valgewicht proeven zijn herkenbaar aan de scherpe pieken in de trillingsmeting in de kelder. Er zijn drie series uitgevoerd. De eerste serie aan de zijde van het appartementengebouw, de tweede serie op de fundering van de brug aan de sluit zijde, de derde serie aan dezelfde kant maar net naast de fundering. Tabel bijlage H.3 geeft de tijdstippen van de valgewichtproeven per serie.

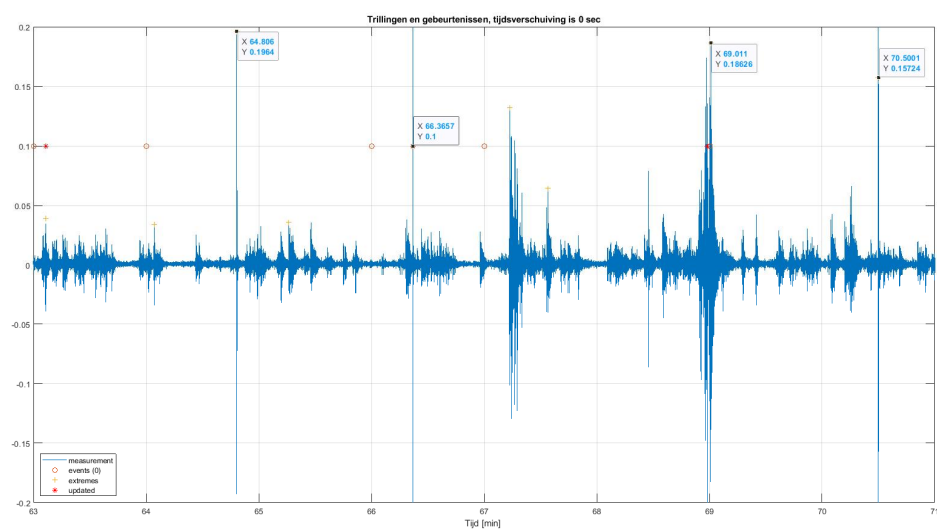
Tabel bijlage H.3 Tijdstippen van de valgewicht klappen

Klap	Serie 1	Serie 2	Serie 3
1	15:24:59	16:04:48	16:17:12
2	15:25:54	16:06:22	16:18:26
3	15:28:14	16:08:28	16:19:44
4	15:29:51	16:10:30	16:20:56

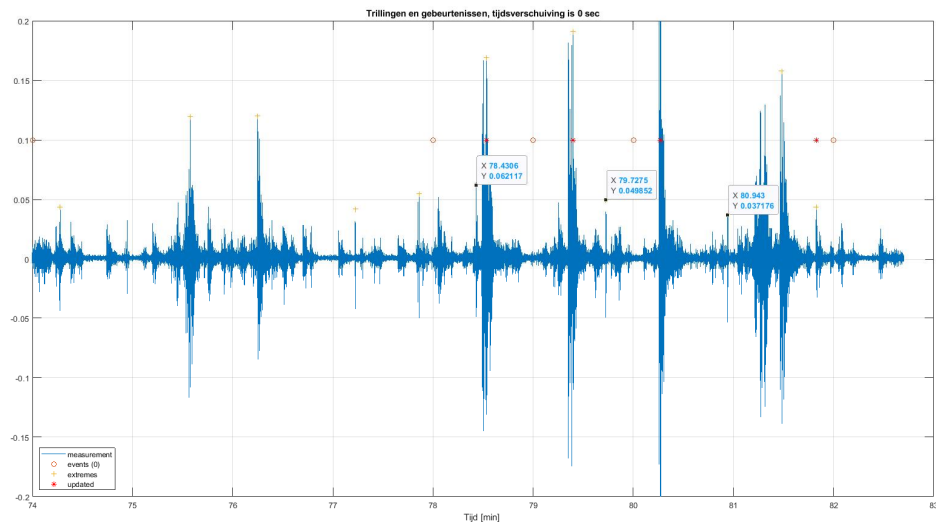
Deze bijlage H.2 toont de figuren waarin de scherpe pieken van de klappen zichtbaar zijn. Deze zijn op dit moment niet verder beschouwd omdat de huidige brugsluitingen konden worden opgeschaald.



Figuur bijlage H.7 Bepalen tijdstippen valgewichtproeven serie 1



Figuur bijlage H.8 Bepalen tijdstippen valgewichtproeven serie 2



Figuur bijlage H.9 Bepalen tijdstippen valgewichtproeven serie 3

H.4 Verdere uitwerking van de trillingen van de brugsluitingen

In eerste instantie gaat de interesse uit naar de brugsluitingen. Tijdens de tweede en derde brugsluiting zijn ook twee valgewichtproeven uitgevoerd, deze zijn duidelijk herkenbaar, zie Figuur bijlage H.4, Figuur bijlage H.5 en Figuur bijlage H.6. Het idee is om op basis van deze meetresultaten een schatting te maken van het trillingsniveau bij het (mogelijk ongecontroleerd) dichtvallen van de brug.

Om na te gaan of de huidige sluitingen waarneembare trillingen in de panden geven, zijn alle trillingen die gemeten zijn tijdens de brugsluitingen in één figuur getekend. Figuur bijlage H.10, Figuur bijlage H.11 en Figuur bijlage H.12 tonen de resultaten.

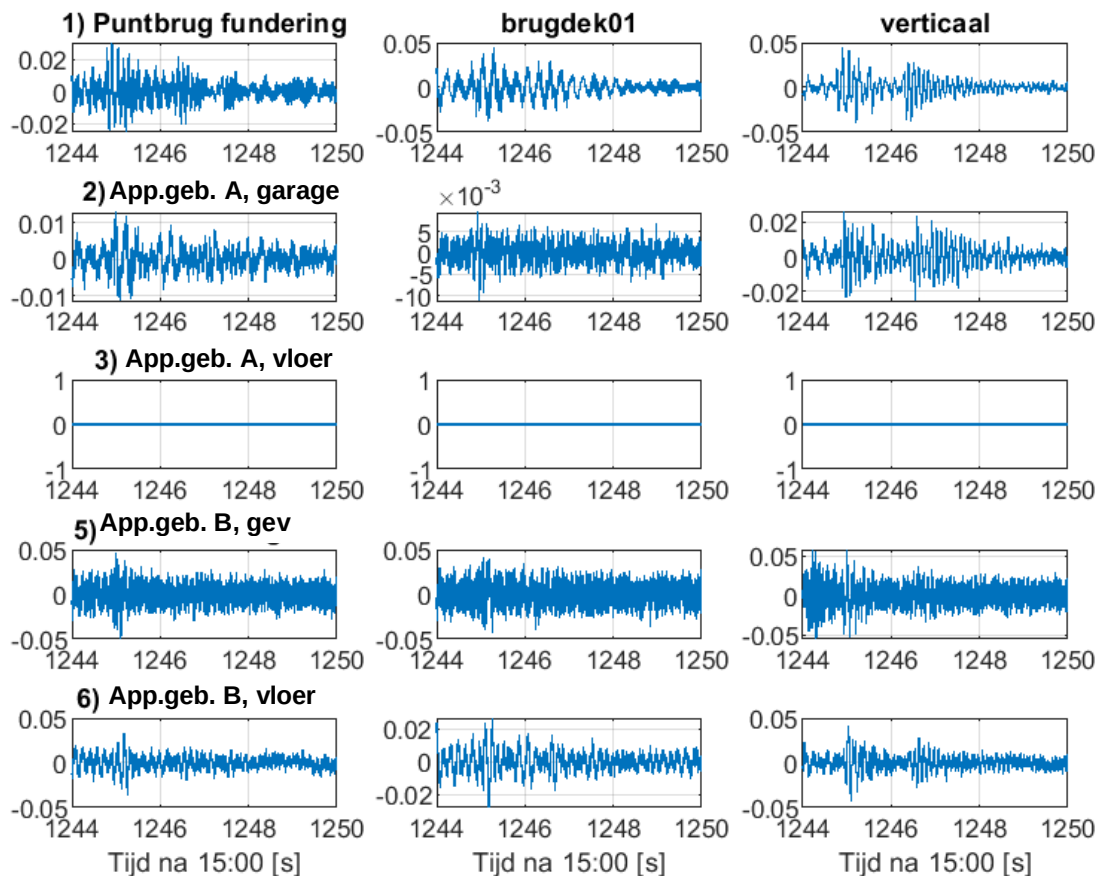
Deze figuren hebben steeds drie kolommen en vijf rijen. De kolommen gelden steeds voor een richting: de linker kolom geeft de horizontale trillingen loodrecht op de as van het kanaal, de middelste kolom geeft de horizontale trillingen evenwijdig aan het kanaal en de rechterkolom geeft de verticale trillingen. Ter ondersteuning is boven deze kolom het woord "verticaal" opgenomen. Boven de middelste kolom staat een korte identificatie van de meting, deze is bedoeld als ondersteuning om fouten te voorkomen. In de linker kolom staat voor elke rij de plaats van de opnemer op de betreffende rij. Elke figuur geeft horizontaal de tijd aan weer en verticaal de trillingssnelheid. De tijd staat in secondes vanaf 15:00 uur. Door de tijdstippen door 60 te delen worden de tijdstippen vergelijkbaar met de tijdstippen in Figuur bijlage H.4 tot en met Figuur bijlage H.6.

De trillingssnelheid staat in mm/s. Bij deze figuren wordt opgemerkt dat de getallen langs de verticale as soms behoort bij de maximale waarde van de as en soms bij het markeerstreepje langs de as. In het laatste geval is ook de maatlijn die bij het markeerstreepje hoort lichtgrijs getekend en staat het getal iets lager geschreven. Als voorbeeld in Figuur bijlage H.10 de vierde regel "5) App.geb. B": in het linker plaatje slaat de waarde 0,05 op het maximum van de as (dus is de maximale trilling iets kleiner dan 0,05) en in het rechterplaatje slaat de waarde 0,05 op het streepje bij de as (en is de maximale trilling iets groter dan 0,05).

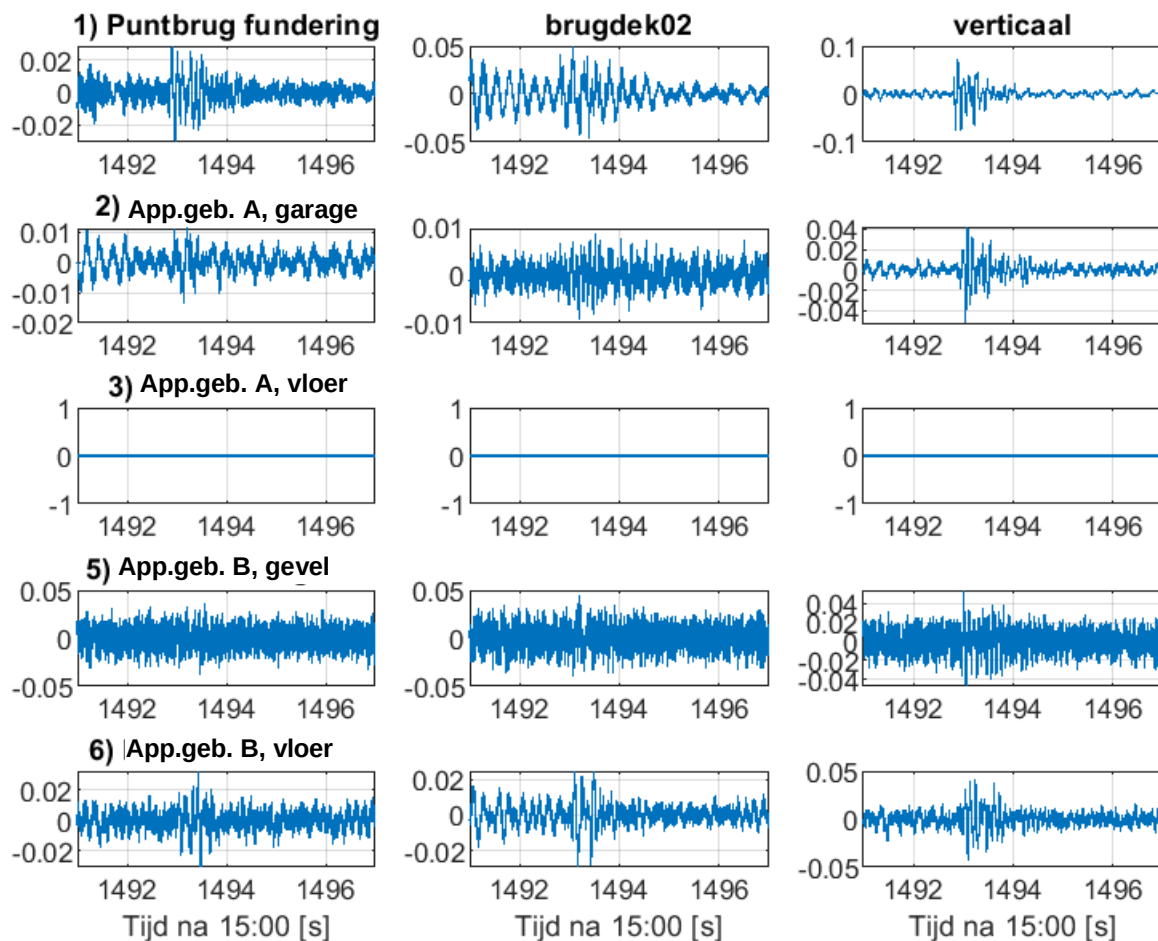
Bij de tweede en derde brugopening, zie Figuur bijlage H.11 en Figuur bijlage H.12 is duidelijk één trilling zichtbaar in het verticale signaal in de kelder van de Puntbrug (rechter kolom, rechtsboven). In de verticale trillingen in de parkeergarage (tweede rij rechter kolom) en de vloer van de Pand E (onderste figuur rechter kolom) kunnen deze signalen worden teruggevonden. Ook aan de gevel

van appartementengebouw B is de trilling zichtbaar, maar deze signalen hebben een veel hoger ruisniveau. Ook in de meeste andere signalen is de trilling zichtbaar, maar komt deze weinig boven de ruis in de opnemers uit.

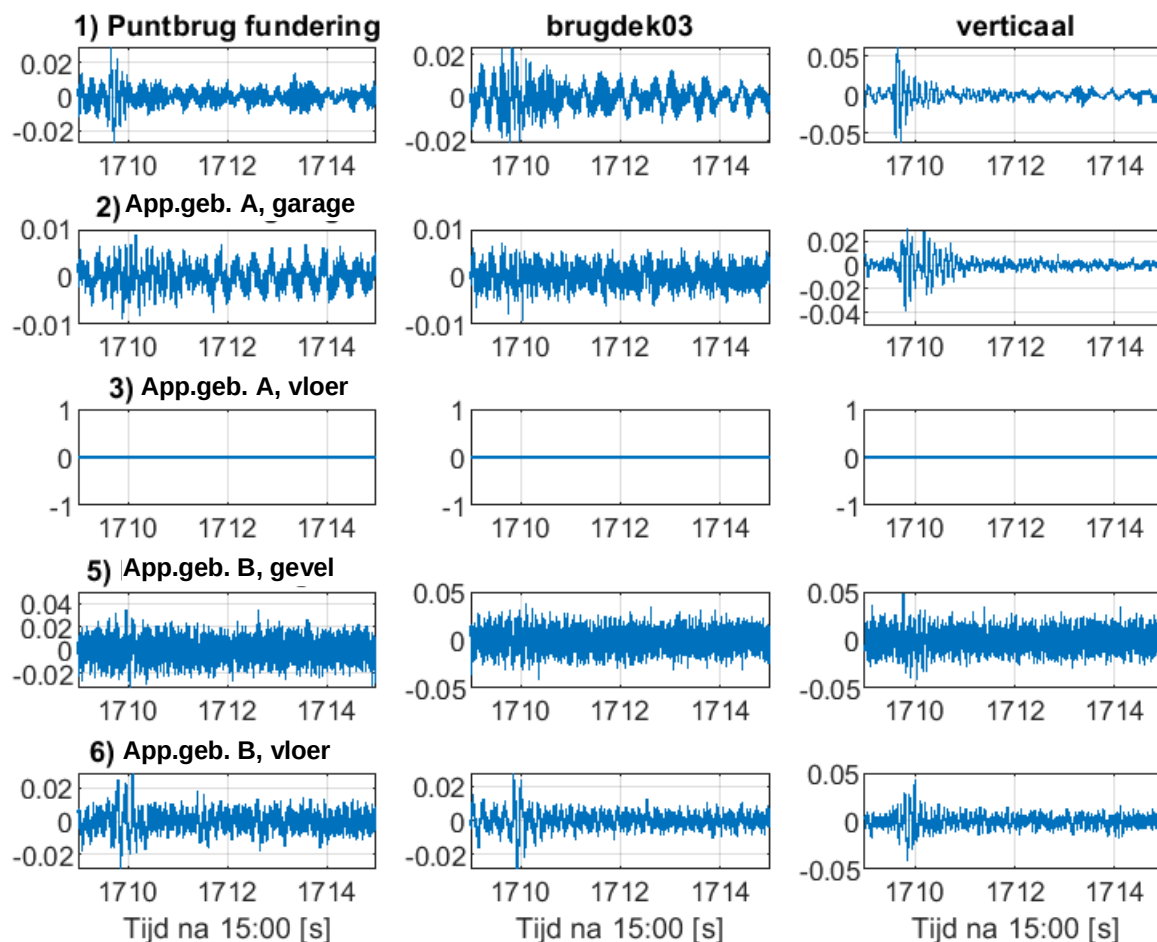
Bij de eerste brugopening, zie Figuur bijlage H.10, lijken er twee trillingen op te treden. Het is onduidelijk wat dit veroorzaakt heeft. Mogelijk heeft het met de bediening of het controle mechanisme te maken, of is er soms sprake van enig stuiteren van het brugdek.



Figuur bijlage H.10 Gemeten snelheid [mm/s] in kelder en panden tijdens eerste extra brugsluiting



Figuur bijlage H.11 Gemeten snelheid [mm/s] in kelder en panden tijdens tweede extra brugsluiting

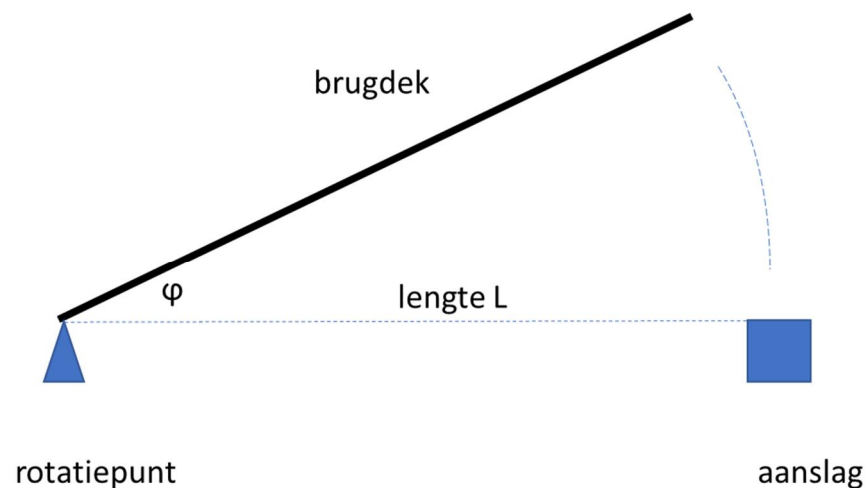


Figuur bijlage H.12 Gemeten snelheid [mm/s] in kelder en panden tijdens derde extra brugsluiting

Op de fundering van de kelder van de Puntbrug wordt een trillingsniveau tijdens het sluiten van ongeveer 0,05-0,08 mm/s gemeten. Het betreft hier de verticale trilling, die in bovenstaande figuren in het plaatje rechtsboven wordt getoond, maar beter zichtbaar zijn in de Figuren Figuur bijlage H.7, Figuur bijlage H.8 en Figuur bijlage H.9. In de panden in de omgeving worden op dat moment vergelijkbare trillingen gemeten, die niet boven de 0,05 mm/s uitkomen. Deze zijn zichtbaar in de rechter kolom van de bovenstaande figuren.

H.5 Model voor ongecontroleerde sluiting van een brug

Om de trillingen tijdens het sluiten van de brug te modelleren is gebruik gemaakt van een vereenvoudigd model. Het bestaat uit een vallende staaf, die roteert om het uiteinde.



Figuur bijlage H.13 Dichtvallen brugdek: geometrie voor model als staaf

Bij een gegeven initiële valhoogte h_0 kan via de wet van behoud van energie de trefsnelheid op de aanslag worden bepaald.

$$E_{\text{kinetisch}} = \alpha E_{\text{potentieel}} \quad (0.1)$$

Met:

$E_{\text{kinetisch}}$ kinetische energie [J]

$E_{\text{potentieel}}$ potentiële energie [J]

α efficiëntie factor ($0 < \alpha < 1$)

Invullen van de energietermen geeft

$$\frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2 = \alpha m g h_0 \quad (0.2)$$

Met:

J het rotatietraagheidmoment van de staaf om het uiteinde: $J = m_b L^2 / 3$ [kgm^2]

m_b de bewegende massa van het brugdek [kg]

φ de openingshoek [rad]

L de lengte van de overspanning [m]

m_a de aandrijvende massa van het brugdek [kg]

g de versnelling ten gevolge van de zwaartekracht [m/s^2]

h_0 de initiële hoogte van het massa zwaartepunt (in het midden van de brug) [m]

Omdat het massa zwaartepunt van de brug ongeveer in het midden zit, is deze ongeveer de helft van de valhoogte van het einde van het brugdek ($u_0 = 2h_0$)

Deze vergelijking heeft een aantal beperkingen. De initieel aanwezige snelheid wordt verwaarloosd. Er wordt uitgegaan van kleine vervormingen.

De trefsnelheid van de aanslag kan nu worden bepaald uit:

$$\dot{\phi} = \sqrt{\frac{6m_a \alpha g u_0}{2m_b L^2}} \quad (0.3)$$

Bij een andere valhoogte wordt de rotatiesnelheid bepaald uit vergelijking (5.2). Herschrijven geeft:

$$\dot{\phi}_{klap} = \dot{\phi}_{nu} \sqrt{\frac{\alpha u_{o,klap}}{u_{o,nu}}} \quad \text{Vergelijking 9-1}$$

Met:

$u_{o,klap}$ de valhoogte tijdens het dichtvallen [m]

$\dot{\phi}_{klap}$

de rotatiesnelheid bij het dichtklappen [rad/s]

$u_{o,nu}$

de 'valhoogte' tijdens de huidige sluit procedure [m]

$\dot{\phi}_{nu}$

de rotatiesnelheid tijdens de huidige sluit procedure [rad/s]

De waarde van de rotatie $\dot{\phi}$ is evenredig met de snelheid waarmee de brug de oplegging raakt en daarom gekozen als maat voor de trillingssnelheid in de omgeving.

Voor de efficiëntiefactor wordt gekozen $\alpha = 0,8$ omdat het grote brugdek relatief veel luchtweerstand genereert. Maar bij een kleine afstand speelt dit nagenoeg geen rol en geldt $\alpha = 1,0$. Daardoor staat de waarde van α niet in de teller van de vergelijking.

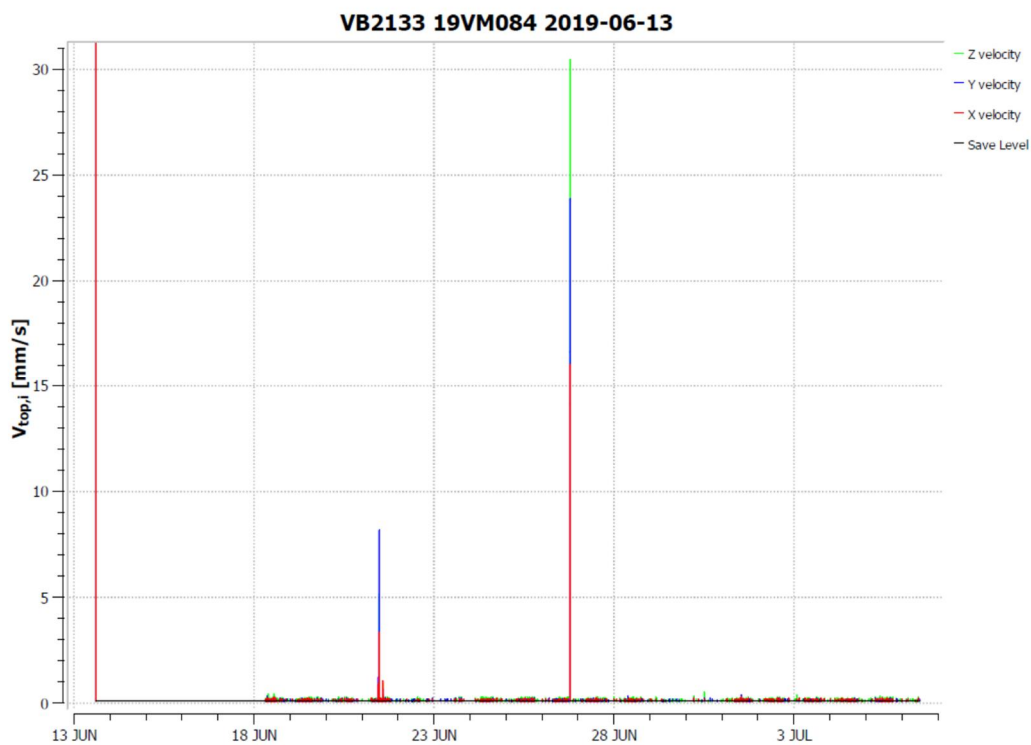
De brug is een evenwichtsconstructie, waardoor de bewegende massa veel groter is dan de aandrijvende massa. Maar de aanwezige potentiële energie is de maat en die hangt af de aandrijvende massa, die bepaald wordt door de onbalans van het systeem. Die is veel kleiner dan de bewegende massa.

In de analyses in paragraaf 5.6.5 is ingevuld $u_0 = 3$ m, wat betekent dat het uiteinde van de brug zich op $h_0 = 6$ m bevindt. De stand hoek is dan ongeveer 27° ten opzichte van de horizontaal.

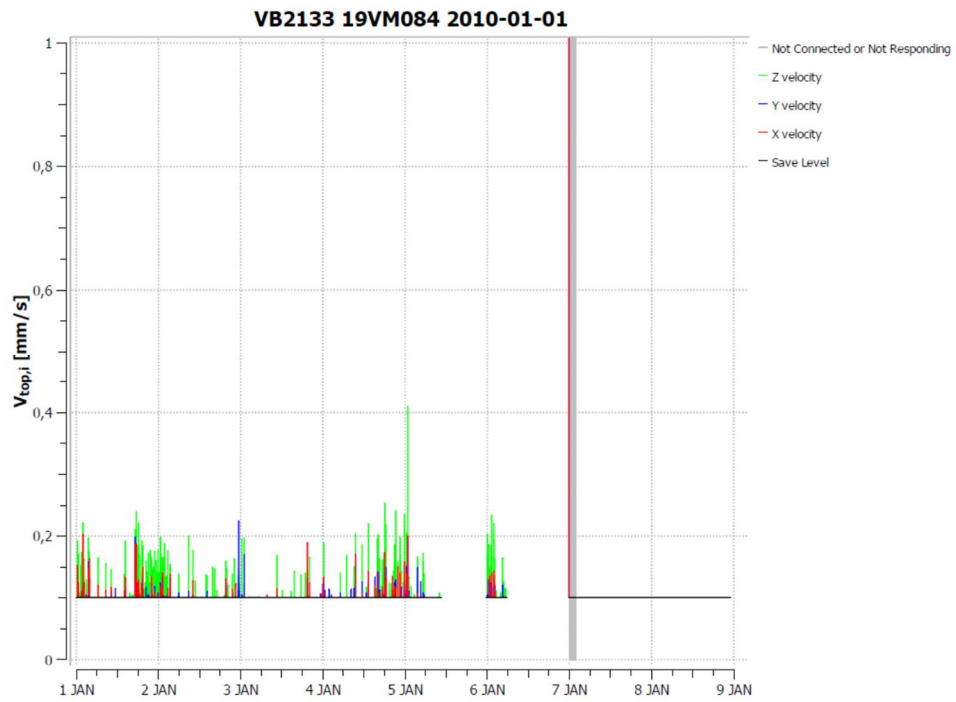
I Resultaten van de onbemande meting prioriteitspand

I.1 Alle resultaten van de opnemers

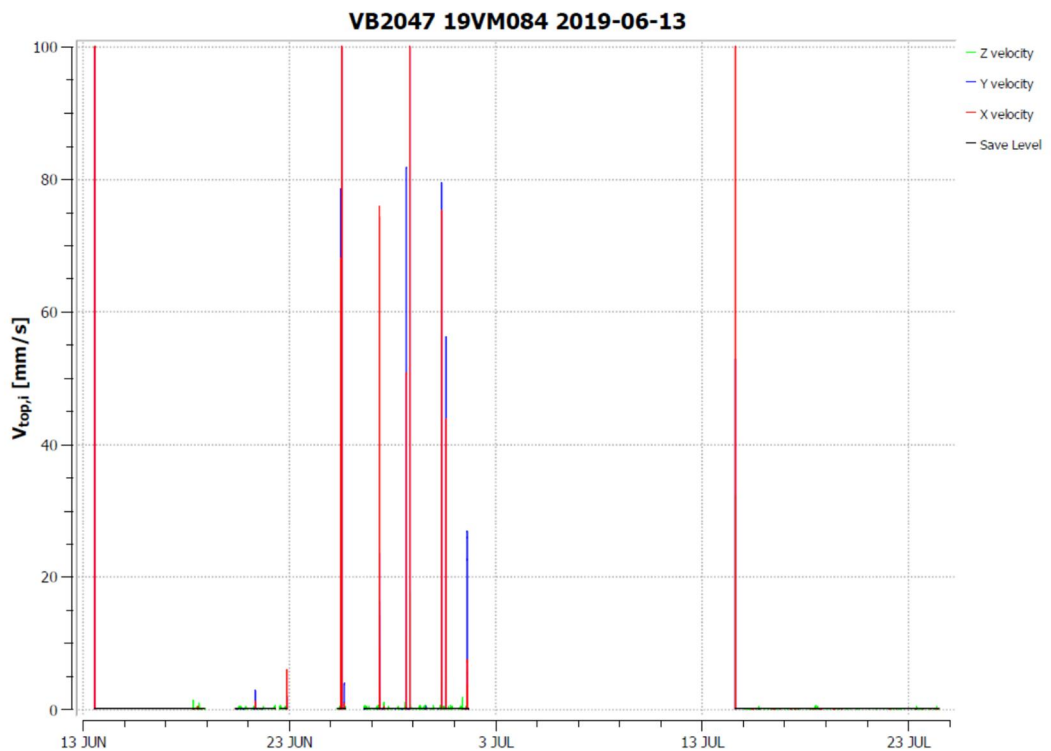
In deze paragraaf zijn alle waarden van de onbemande meting aan het prioriteitspand weergegeven, zonder de beoordeling op basis van gelijktijdigheid.



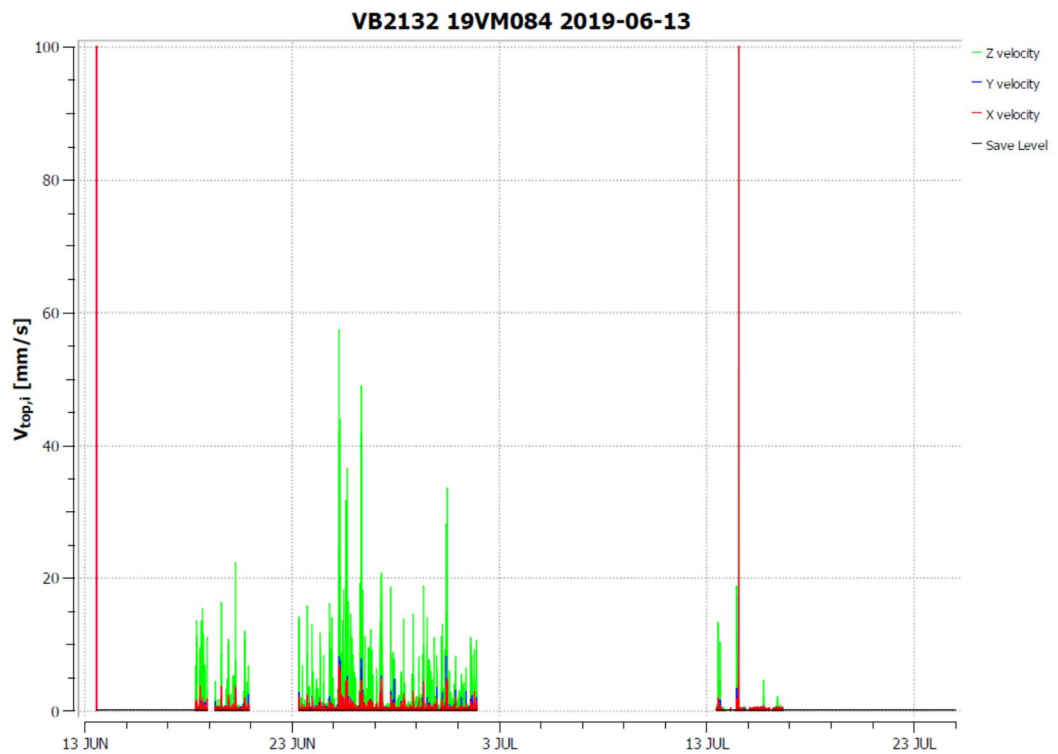
Figuur bijlage I.1 Trillingen aan de muur (eerste periode 18 juni-6 juli)



Figuur bijlage I.2 Trillingen aan de muur (tweede periode 18-23 juli)



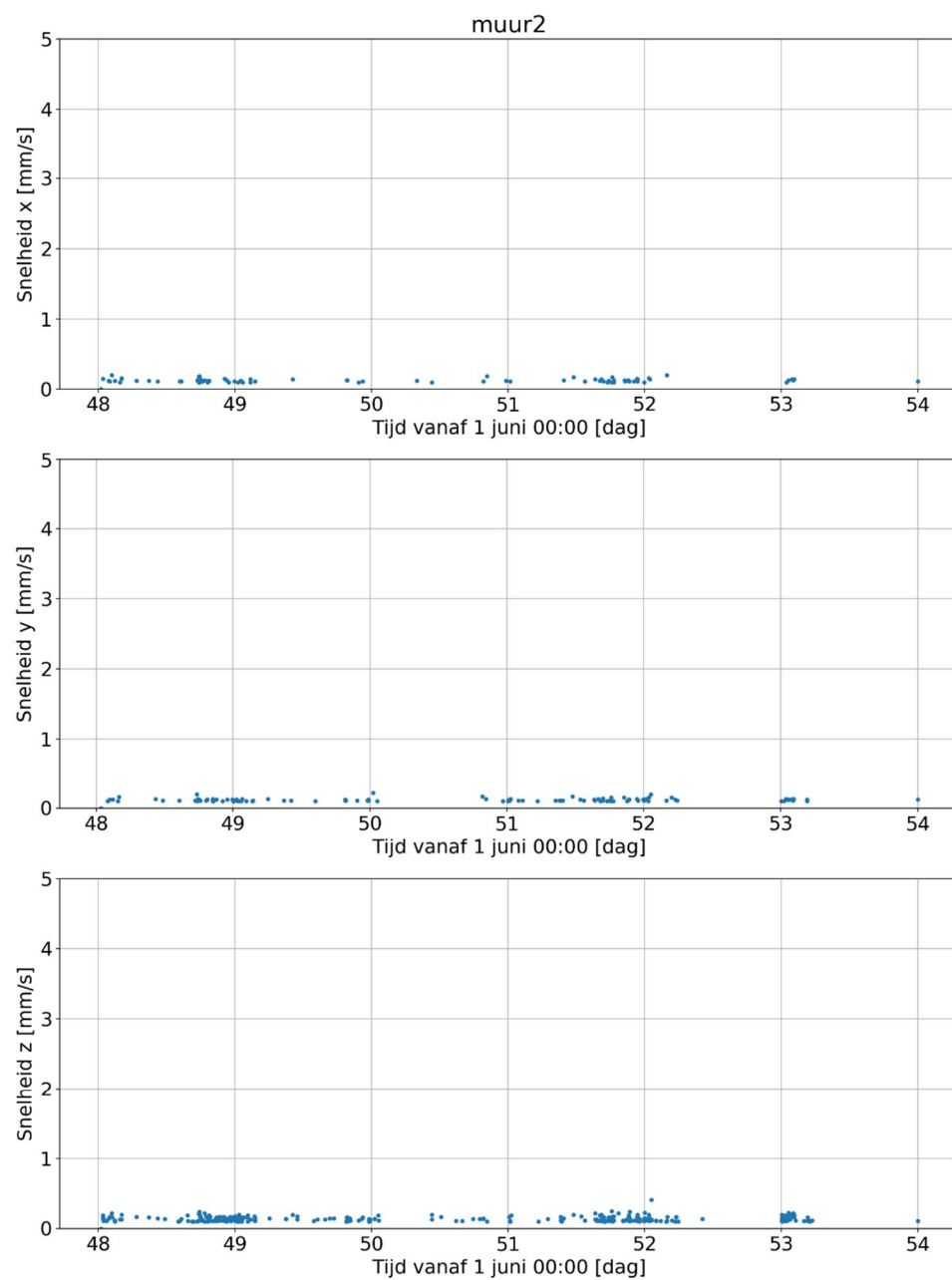
Figuur bijlage I.3 Alle trillingen op de begane grond vloer



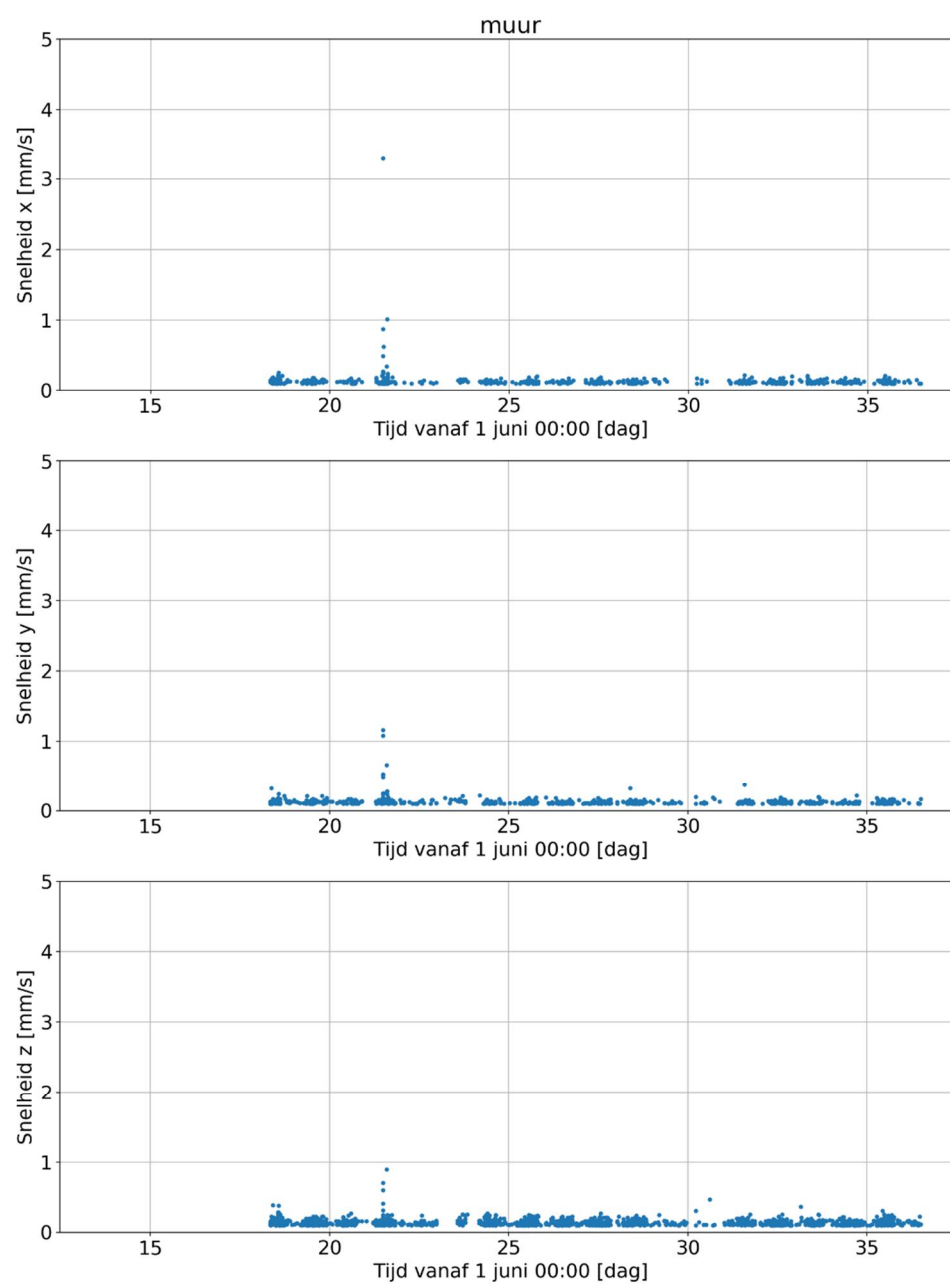
Figuur bijlage I.4 Alle trillingen op de vloer eerste verdieping

I.2 Presentatie lagere trillingsniveaus

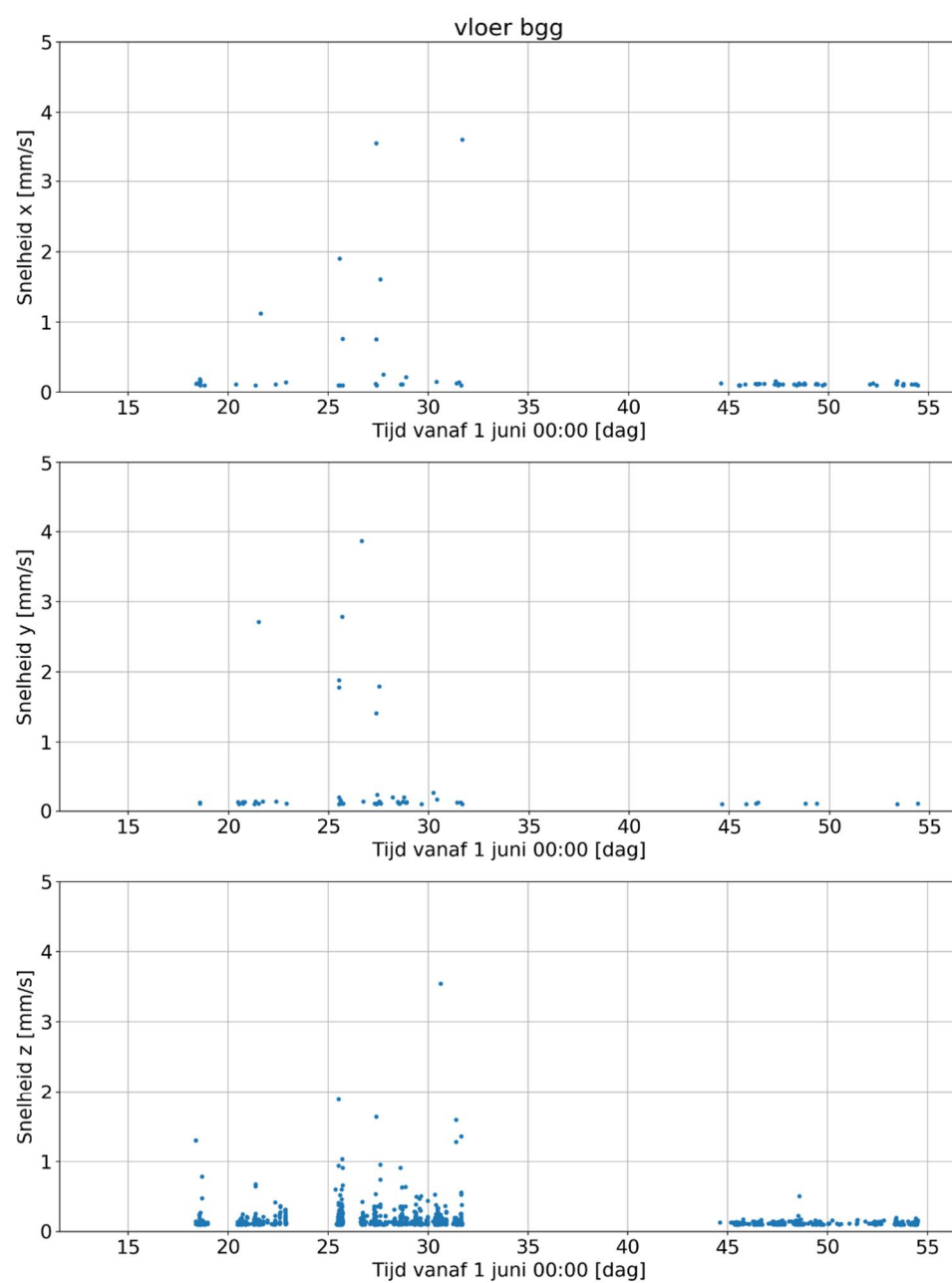
Deze paragraaf geeft dezelfde meetresultaten maar op een andere schaal, zodat de uitschieters niet overheersen. Omdat de trillingen als los puntje zijn weergegeven, vallen de hoogste trillingen buiten de figuren.



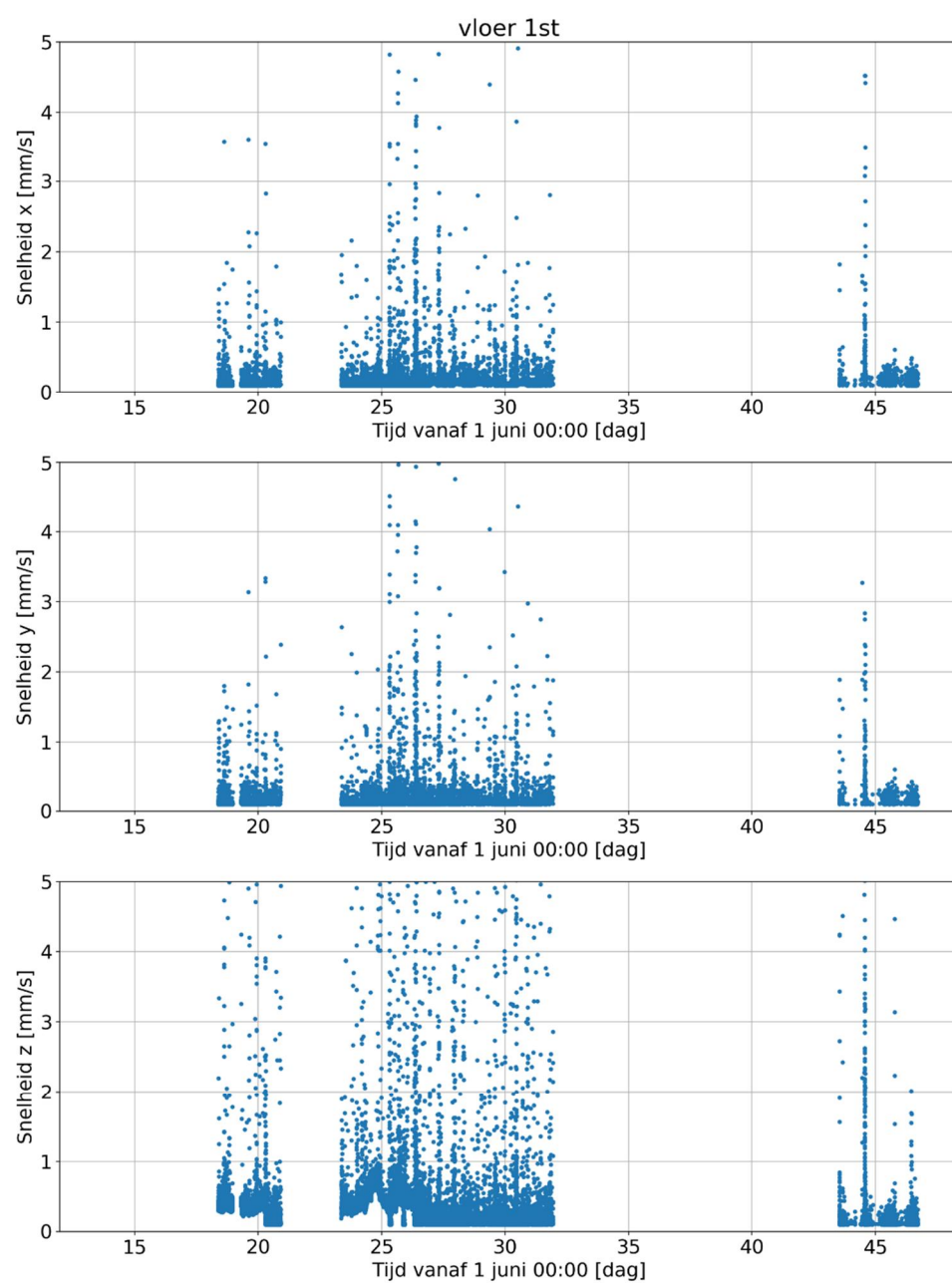
Figuur bijlage I.5 - Maximale gemeten trillingssnelheid aan de muur (eerste deel meting)



Figuur bijlage I.6 Maximaal gemeten trillingssnelheid aan de muur (deel 2)



Figuur bijlage I.7 Gemeten trillingssnelheid aan de vloer van de begane grond



Figuur bijlage I.8 Gemeten trillingssnelheid aan de vloer van de eerste verdieping

J Maximale trillingssnelheden tijdens de bemande meting bij de Puntbrug

J.1 Resultaten meting Puntbrug: passages vrachtwagen

vrachtwagen	1) Puntbrug fundering			2) Puntkolk garage			3) Puntkolk vloer			5) Hoofdstraat gevel			6) Hoofdstraat vloer		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	0.09	0.20	0.21	0.04	0.03	0.17	0.00	0.00	0.00	0.08	0.09	0.08	0.06	0.06	0.07
2	0.05	0.14	0.18	0.03	0.02	0.12	0.00	0.00	0.00	0.07	0.06	0.08	0.05	0.02	0.10
3	0.05	0.09	0.11	0.03	0.02	0.11	0.00	0.00	0.00	0.07	0.08	0.14	0.05	0.03	0.07
4	0.10	0.14	0.17	0.04	0.02	0.12	0.00	0.00	0.00	0.08	0.13	0.08	0.04	0.03	0.06
5	0.15	0.28	0.21	0.04	0.04	0.17	0.00	0.00	0.00	0.08	0.07	0.08	0.06	0.04	0.09
6	0.07	0.14	0.15	0.04	0.03	0.12	0.00	0.00	0.00	0.09	0.07	0.07	0.05	0.03	0.08
7	0.04	0.09	0.14	0.03	0.02	0.13	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.06	0.05	0.03	0.07
8	0.08	0.18	0.19	0.04	0.03	0.16	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.08	0.05	0.03	0.11
9	0.03	0.14	0.15	0.03	0.02	0.12	0.03	0.03	0.10	0.09	0.07	0.09	0.03	0.02	0.09
10	0.04	0.09	0.18	0.04	0.03	0.15	0.04	0.03	0.10	0.07	0.06	0.09	0.05	0.02	0.09
11	0.08	0.27	0.27	0.05	0.03	0.22	0.05	0.03	0.15	0.07	0.09	0.08	0.07	0.06	0.11
12	0.06	0.19	0.19	0.04	0.03	0.14	0.04	0.03	0.13	0.09	0.08	0.09	0.06	0.03	0.11
13	0.09	0.20	0.21	0.04	0.02	0.15	0.04	0.03	0.10	0.07	0.07	0.07	0.06	0.04	0.08
max	0.15	0.28	0.27	0.05	0.04	0.22	0.05	0.03	0.15	0.09	0.13	0.14	0.07	0.06	0.11
gem	0.07	0.17	0.18	0.04	0.03	0.14	0.02	0.01	0.04	0.07	0.08	0.08	0.05	0.03	0.09
stdev	0.033	0.062	0.040	0.007	0.006	0.030	0.022	0.016	0.060	0.011	0.021	0.018	0.010	0.013	0.017

J.2 Resultaten meting Puntbrug: passages tractor

tractor	1) Puntbrug fundering			2) Puntkolk garage			3) Puntkolk vloer			5) Hoofdstraat gevel			6) Hoofdstraat vloer		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	0.03	0.07	0.13	0.03	0.02	0.09	0.00	0.00	0.00	0.07	0.06	0.07	0.04	0.03	0.07
2	0.09	0.18	0.15	0.05	0.03	0.14	0.00	0.00	0.00	0.07	0.06	0.09	0.06	0.04	0.12
3	0.07	0.23	0.19	0.03	0.02	0.15	0.00	0.00	0.00	0.08	0.09	0.08	0.06	0.04	0.11
4	0.06	0.14	0.18	0.51	0.16	0.79	0.00	0.00	0.00	0.26	0.31	0.42	0.25	0.21	0.32
5	0.07	0.17	0.15	0.07	0.06	0.14	0.00	0.00	0.00	0.08	0.06	0.07	0.05	0.02	0.09
6	0.06	0.13	0.13	0.05	0.02	0.10	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.03	0.03	0.07
7	0.06	0.12	0.11	0.02	0.02	0.09	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.09	0.04	0.03	0.12
8	0.06	0.14	0.13	0.03	0.02	0.09	0.00	0.00	0.00	0.09	0.12	0.08	0.03	0.03	0.05
9	0.04	0.18	0.19	0.02	0.02	0.11	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05	0.06	0.04	0.02	0.06
10	0.05	0.12	0.15	0.04	0.02	0.14	0.00	0.00	0.00	0.08	0.09	0.20	0.06	0.03	0.07
11	0.03	0.08	0.07	0.02	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04	0.07	0.04	0.03	0.04
12	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.04	0.02	0.01	0.02
13	0.07	0.11	0.13	0.03	0.02	0.08	0.00	0.00	0.00	0.09	0.13	0.11	0.04	0.03	0.09
14	0.08	0.23	0.21	0.04	0.03	0.15	0.00	0.00	0.00	0.09	0.07	0.08	0.05	0.04	0.18
max	0.09	0.23	0.21	0.51	0.16	0.79	0.00	0.00	0.00	0.26	0.31	0.42	0.25	0.21	0.32
gem	0.06	0.14	0.14	0.07	0.03	0.15	0.00	0.00	0.00	0.08	0.09	0.11	0.06	0.04	0.10
stdev	0.022	0.061	0.052	0.128	0.040	0.187	0.000	0.000	0.000	0.054	0.069	0.097	0.056	0.048	0.076

K Resultaten meetproef op de Puntbrug

Extern bestand: Bijlage trillingen rijproef Puntbrug.pdf

L Rapportage uitwerking vervangende damwanden 2019 11203512-006-GEO

Extern bestand: 11203512-006-GEO-0006_v0.1-Uitwerking trillingsmetingen bij vervanging
BIJLAGE L.pdf

M Rapport Movares trillingen Vroomshoop en Marienberg

Extern bestand: Movares rapport trillingen Vroomshoop en Marienberg, versie 2.1, 14 oktober 2019.pdf

N Analyse van de vervorming van een poerfundering door grondwaterstandstijging

N.1 Invloed van grondwaterstandverhoging op de panden

Een stijging van het grondwaterpeil zal leiden tot afname van het draagvermogen van de fundering van de panden met als mogelijk gevolg vervormingen in de ondergrond ter plaatse van het pand. De vervormingen zijn onderzocht in een axiaal-symmetrische PLAXIS simulatie.

De berekeningen zijn oriënterend voor een grondopbouw, grondwaterhuishouding, fundering en belastingen die representatief zijn voor panden in het gebied. De berekening is niet representatief voor één specifiek pand. Het doel van de berekeningen is een indruk te krijgen van de orde van grootte van de vervormingen als gevolg van de belasting van het pand en de stijging van de grondwaterstand.

Voor de fundering is uitgegaan van een poerenfundering met een funderingsniveau op de eerste (natuurlijk voorkomende) vaste zandlaag circa 2 m onder maaiveld. De huizen zijn van oudsher en ook bij volledige nieuwbouw altijd op deze laag gefundeerd.

In de berekeningen is één enkele poer gesimuleerd. De berekeningen zijn gemaakt met variatie van:

- De draagkracht van de ondergrond (uitgedrukt in de wrijvingshoek van de draagkrachtige zandlaag, 32,5 en 35 graden).
- De belasting op de poer (veiligheid ten opzichte van de draagkracht van de minst draagkrachtige poer 1,74 respectievelijk 1,54, volgens een analytische berekening volgens NEN 9997-1+C2:2017).
- De stijging van de grondwaterstand (0,2 m, 0,45 m en 0,65 m).

De draagkracht van de minst draagkrachtige poer is bepaald met verwachtingswaarden bij een stijging van de grondwaterstand gelijk aan 0.

N.2 Laagopbouw en materiaaleigenschappen

In de simulatie is uitgegaan van een maaiveld op NAP +9,8 m. Daaronder bevindt zich een toplaag van zand van 1,0 m dik en daaronder een veenlaag van 0,8 m. Hieronder zit siltig zand en schoner grof zand. De ondergrond schematisatie is gebaseerd op de grondonderzoeken uitgevoerd door Fugro in 2019 [4]. Onder het pand bevindt zich een kruipruimte tot 0,5 m beneden maaiveld.

In de PLAXIS berekening is de zandlaag waarop de fundering staat gemodelleerd met het Hardening Soil model. De toplaag zand en de veenlaag zijn niet discreet geschematiseerd. Initieel is dit geprobeerd; het bleek niet mogelijk om de berekening uit te voeren vanwege numerieke instabiliteit. Om deze reden zijn de toplaag zand en de veenlaag vervangen door een even grote verticale belasting.

De toegepaste materiaalparameters zijn gegeven in onderstaande tabel. De gegeven parameters zijn verwachtingswaarden.

Tabel 9.1 Waarden van de grondparameters in de PLAXIS berekening

Parameter	Eenheid	Toplaag zand	Veen	Siltig zand
Volumiek gewicht boven grondwater γ_{unsat}	kN/m ³	18	11	18
Volumiek gewicht boven grondwater γ_{sat}	kN/m ³	20	11	20
E_{50}^{ref}	kPa	-	-	35.000
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kPa	-	-	35.000
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kPa	-	-	105.000
power (m)	-	-	-	0,5
Wrijvingshoek ϕ	graden	-	-	30
Dilatantiehoe ψ	graden	-	-	0
Dwarscontractiecoëfficiënt ν_{ur}	-	-	-	0,2
Tension cut-off	-	-	-	Ja
Treksterkte	kPa	-	-	0
$K_{0,x}$		-	-	0,4627
$K_{0,y}$		-	-	0,4627
OCR	-	-	-	1

Voor de poer is uitgegaan van een lineair elastisch materiaal met een elasticiteitsmodulus van 25.000 kN/m² en een dwarscoëfficiënt van 0,15.

N.3 Grondwaterstanden

De waarden in Tabel 9.2 zijn ontleend aan de metingen rond de voorzijde van het prioriteitspand van de casus in paragraaf 4.5.

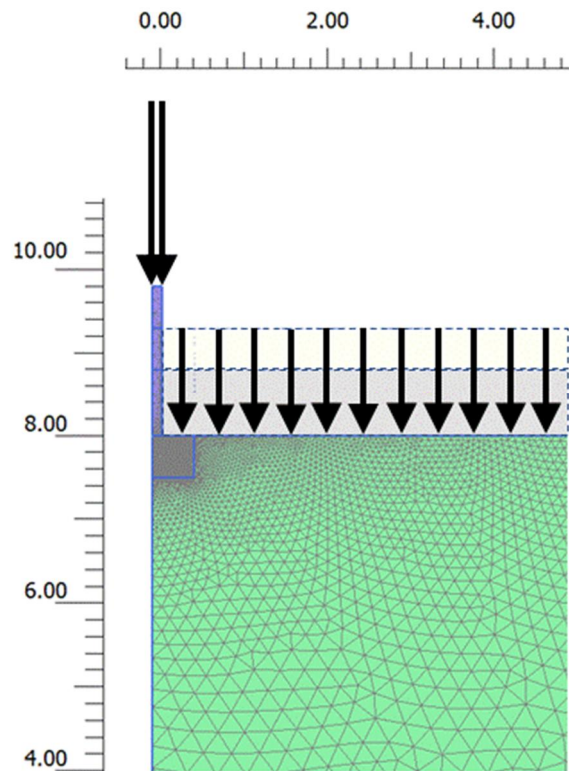
Tabel 9.2 Grondwaterstanden

Situatie	Grondwaterstand [m NAP]
Zomer	+7,20
Winter	+8,00
Winter en verhoging door baggeren	+8,20 / +8,45 / +8,65

N.4 Fundering

De poerenfundering bestaat uit vierkante gemetselde poeren 0,21x0,21 m² met een hart-op-hartafstand van 1,5 m. De PLAXIS berekening is opgezet voor één enkele poer in axiaal-symmetrie. Hierin is de poer een cylinder met dezelfde doorsnede als de vierkante poer 0,21x0,21 m².

De schematisatie is gegeven in Figuur 9.1.



Figuur 9.1 PLAXIS schematisatie van de poerenfundering, axiaal-symmetrie.

Het gewicht van het huis en additionele belastingen wordt op de bovenkant van de poer aangebracht. De aangebrachte belasting wordt uitgedrukt als veiligheid ten opzichte van de draagkracht van de minst draagkrachtige poer, bepaald volgens de draagkrachtberekening in NEN 9997-1+C2:2017 Geotechnisch ontwerp van constructies.

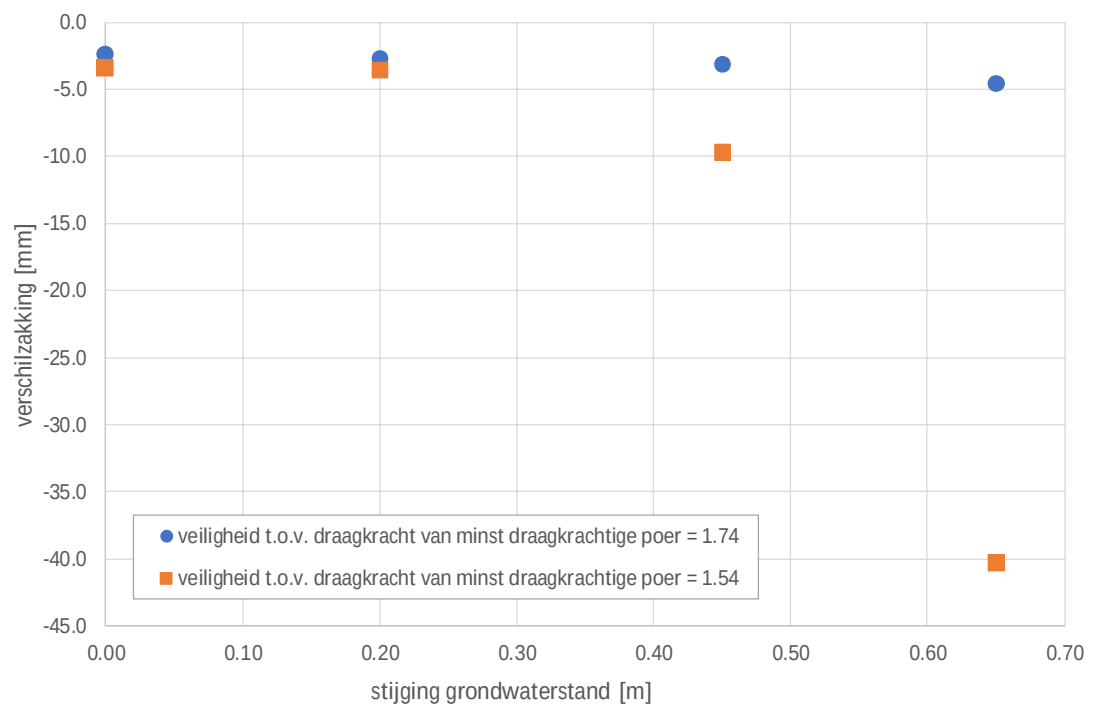
N.5 Rekenfasering PLAXIS berekening

De berekening bestaat uit de volgende rekenstappen:

- Opbouw beginsituatie zonder belasting op de poer, met de zomer grondwaterstand.
- Aanbrengen belasting op de poer.
- Verhoging van de grondwaterstand tot winterniveau.
- Verhoging van de grondwaterstand tot winterniveau + een stijging van 0,2 m als gevolg van het baggeren.
- Verhoging van de grondwaterstand tot winterniveau + een stijging van 0,45 m als gevolg van het baggeren.
- Verhoging van de grondwaterstand tot winterniveau + een stijging van 0,65 m als gevolg van het baggeren.

N.6 Resultaten PLAXIS vervormingsberekening

Figuur 9.2 geeft de berekende verschilzakking tussen een poer op een minder draagkrachtige zandlaag (wrijvingshoek 32,5 graden) en een poer op een meer draagkrachtige zandlaag (wrijvingshoek 35 graden), als gevolg van een stijging van de grondwaterstand tot een niveau dat nog niet eerder is bereikt, bijvoorbeeld als gevolg van neerslag. De verticale verplaatsing gegeven in de figuren is neerwaarts gericht (zakking). De verschilzakking is berekend bij twee belastingniveaus van de minst draagkrachtige poer: veiligheid ten opzichte van de draagkracht 1,74 (blauwe punten in Figuur 9.2) en veiligheid ten opzichte van de draagkracht 1,54 (oranje punten in Figuur 9.2). Bij de berekening van de verschilzakking is geen rekening gehouden met herverdeling van belasting in de constructie van het pand.



Figuur 9.2 Verschilzakking tussen een poer op een minder draagkrachtige zandlaag en een poer op een meer draagkrachtige zandlaag, als gevolg van een stijging van de grondwaterstand boven het niveau dat nog niet eerder is bereikt, voor verschillende belastingniveaus van de poer

O Afleiding schadecriterium voor verzakkingen

Verschillende processen kunnen leiden tot zakking van de fundering. Als de zakkingen groot zijn kan dit aanleiding geven tot schade aan de constructie. Deze paragraaf geeft het criterium voor de zakking dat aanleiding kan geven tot schade. De methode in deze paragraaf is gebaseerd op eerder onderzoek dat Deltares heeft uitgevoerd naar de invloed van bodemdaling door zoutwinning [13]. De methode is versimpeld door geen rekening te houden met de invloed van horizontale rek op de relatieve rotatie, de toestand van de constructie en de snelheid waarmee de zakking optreedt. De versimpeling sluit aan bij het benaderend karakter van de methode voor de bepaling van de zakking door installatie van de klapankers (bijlage P).

Schade in metselwerkconstructies ontstaat overschrijding van de trekspanningen, die ontstaan door opgelegde buiging of verlenging van de constructie.

De invloed van opgelegde verticale zakking wordt beschreven (zie ook NEN-norm [14]) door:

- Relatieve rotatie (β_x in Figuur 9.3: gerelateerd aan het verschil in hoogte, w , tussen twee naburige funderingselementen).
- Scheefstand (ω in Figuur 9.3: gerelateerd aan het hoogteverschil, w , over de gehele gevel).

Voor lage panden is de scheefstand vooral een comfortcriterium omdat deze weinig spanningen in de constructie geven. De relatieve rotatie leidt daarentegen wel tot spanningen.

Bij een discrete fundering (zoals een fundering op poeren) is de relatieve rotatie het verschil in de rotatie tussen twee delen. Dit kan worden uitgedrukt in de verticale verplaatsing volgens:

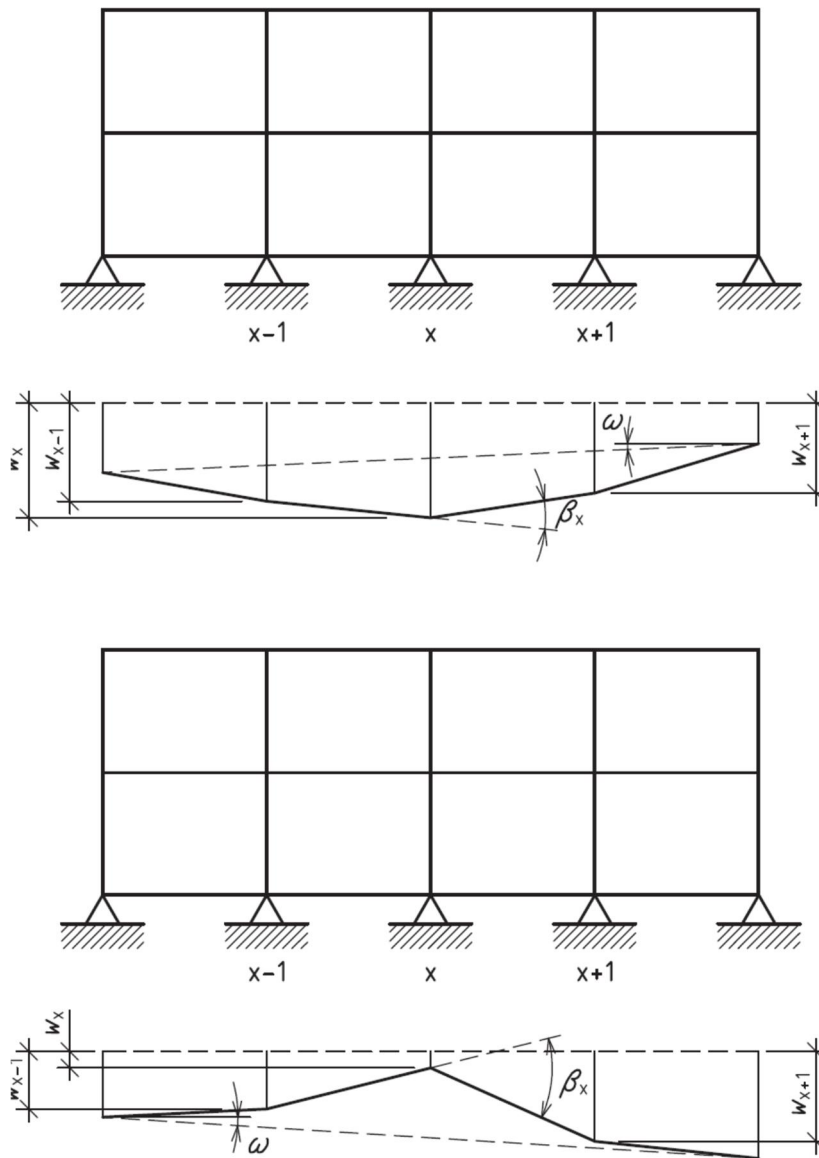
$$\beta_n = \left(\frac{w_n - w_{n-1}}{r_n - r_{n-1}} \right) - \left(\frac{w_{n+1} - w_n}{r_{n+1} - r_n} \right) \quad (0.4)$$

Waarin:

w_n de verticale verplaatsing van steunpunt n is [m].

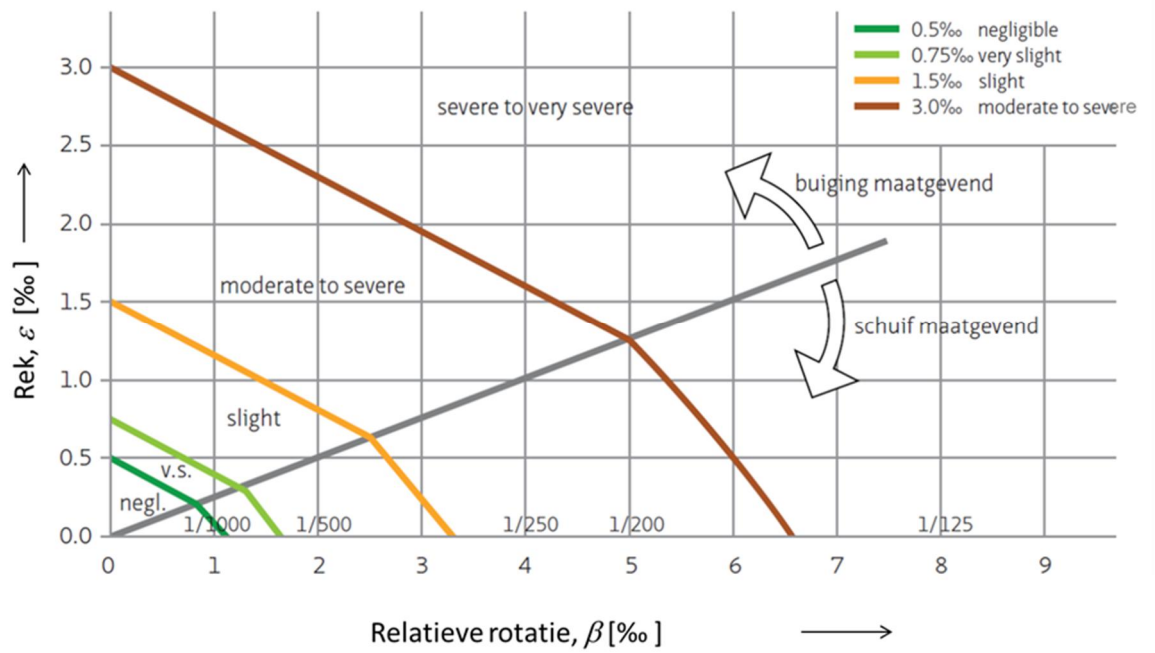
r_n de positie van steunpunt n is (t.o.v. een gekozen referentie) [m].

Voor de referentie wordt meestal het punt met de hoogste zakking genomen, of het epicentrum van de oorzaak van de zakking. Voor de relatieve rotatie is deze keuze niet van belang, het gaat immers om de afstand tussen de steunpunten



Figuur 9.3 Karakterisering scheefstand en relatieve rotatie ten gevolge van zakking [14].

Voor de toelaatbaarheid van de optredende vervormingen wordt gebruik gemaakt van Figuur 9.4. Hierbij wordt de invloed van de horizontale rek verwaarloosd.

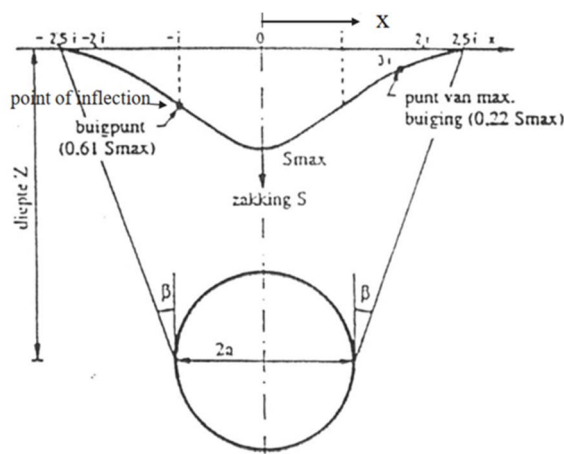


Figuur 9.4 Relatie relatieve rotatie, horizontale rek en schadebeeld naar Son en Gording [17]

P Model voor de invloed van de klapankeers

Bij het installeren van deze ankers ontstaat door het uitklappen van het anker een holle ruimte achter het anker. Deze holle ruimte zal onder de grondwaterstand direct door de omliggende (zand)grond worden opgevuld met een zetting boven het anker tot gevolg. Naar de grootte van deze zettingen van klapankeers in de bovengrond is nog weinig onderzoek verricht. Als de ankers dicht bij elkaar staan kan met onderstaande 2-dimensionale berekeningsmethoden uit de tunnelbouw een eerste benadering van de mogelijke zakking door het ontstaan van de holle ruimte worden gemaakt, zie Figuur 9.5.

In kort wordt hieronder uitgelegd hoe een schatting van de zettingen boven de klapankeers kan worden afgeschat.



Figuur 9.5 Berekeningsmethodiek voor zettingen aan het maaiveld als gevolg van een holle ruimte in de ondergrond

Voor zetting $S(x)$ op afstand x en het volume van de holle ruimte ΔV geldt:

$$S(x) = S_{max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad \text{Vergelijking 9-2}$$

$$\Delta V = S_{max} \cdot i \cdot \sqrt{2\pi} \quad \text{Vergelijking 9-3}$$

Voor cohesieve grond geldt: $i = 0,43z + 1,1$

Voor cohesieloze grond geldt: $i = 0,28z - 0,1$

Waarin z de diepte is.

In de tunnelbouw is wel onderzoek naar de grootte van de maaiveldzakking gedaan. Er is een relatie gevonden met het uitgeboorde volume van de tunnel. Het volume van de holle ruimte is in de orde van 1% tot 3% van het volume van de tunnel. De grootte van de verstoorde ruimte, die gecreëerd wordt bij het inbrengen van klapankeers is onbekend. Hiervoor moet een afschatting gemaakt worden om de verticale zetting (of indien het anker dicht of onder een funderingspoer zit de verzakking van de poer) te bepalen. Er zijn verschillende typen ankers ingebracht met verschillende afmetingen. Tabel 9.3 geeft een overzicht van de verschillende typen ankers en de geschatte volumeverandering. Tijdens het omklappen van het anker maakt het anker een complexe beweging, omdat het scharnierpunt van het anker beweegt. Een eerste schatting van de gecreëerde holle ruimte is het volume dat ontstaat als het anker een kwartslag draait zonder dat het scharnierpunt beweegt. Dit volume wordt bepaald met:

$$V_{rot} = \frac{1}{2} \frac{\pi}{4} L^2 B$$

Vergelijking 9-4

Met:

L de lengte van het klapanker [m]

B de breedte van het klapanker [m]

Omdat het anker ook wordt aangespannen, beweegt het anker naar de damwand toe. Een verplaatsing van het anker van 10% van de lengte van het klapanker komt overeen met een toeslag van ongeveer 30% op de gecreëerde holle ruimte. Dat lijkt een redelijke tot hoge waarde. Daarnaast moet nog rekening worden gehouden het feit dat de werkelijke beweging van het anker complexer is, wat tot een andere waarde van de gecreëerde holle ruimte leidt. Om deze twee effecten mee te nemen is het berekende volume met 30% verhoogd.

Tabel 9.3 Typen gebruikte ankers en geschatte volumeverandering in de ondergrond

Type	Oppervlakte anker [m²]	Breedte anker [mm]	Lengte anker [m]	V _{rot} [m³]	ΔV [m³]
MR-1	0,045	0,125	0,375	0.007	0,009
MR-SR	0,09	0,174	0,524	0.019	0,024
SR-2	0,16	0,231	0,695	0.043	0,056

Uit Tabel 9.3 volgt dat er dan holle ruimten worden gecreëerd na het uitklappen van het anker variërend van circa 10 tot wellicht wel 50 liter.

Met deze geschatte volumeverandering is het dan mogelijk de zetting boven het anker af te schatten. Er wordt een 3D en een 2D benadering uitgewerkt. De 3D benadering is specifiek voor dit project afgeleid, maar niet gevalideerd door metingen. De 2D benadering is experimenteel afgeleid voor tunnelbouw, waarbij het de vraag is in hoeverre deze geldig is voor de situatie met klapankers. Vergelijking van de resultaten van beide benaderingen geeft een indruk van de range waarin de zakkingen zich bevinden.

Voor een ondiep anker ontstaat een cirkelvormige vervormingstrog. Er wordt verondersteld dat het volledige aangebrachte volume bij maaiveld zichtbaar wordt. Echter, het spreidt zich uit over een gegeven hoek α, waardoor voor de straal van het gebied met zakking geldt:

$$R_{mv} = z \cdot \tan(\alpha)$$

Vergelijking 9-5

Met:

α De spreidingshoek; dit is de hoek met de verticale as (omhoogkijkend) door het punt waar de holte zit [graden].

z De diepte van het klapanker [m].

R_{mv} De straal van het zakkingsgebied [m].

Uitgaand van een parabolisch zakkingsverloop met de afstand tot het (epi-)centrum van de zakking geldt voor de maximale zakking:

$$\delta = \frac{2\Delta V}{\pi R_{mv}^2}$$

Vergelijking 9-6

Met:

ΔV het gegenereerde volume uit bovenstaande tabel [m³].

δ de maximale zakking in het cirkelvormige zakkingsgebied [m].

Uitgaande van een deklaag van circa 2 meter veen en dus de diepte van een poer gefundeerd op het onderliggende zand is het hier van belang om de zetting van de poer af te schatten (niet het maaiveld). Bij een anker lengte van 11 meter en een hoek van 28 graden komt een anker op circa 10 m vanaf het kanaal op een diepte van circa 5 m. Dit is circa 3 meter onder een mogelijke poer van huizen die op een afstand van 10 meter uit het kanaal staan. Bij een spreidingshoek van 22.5° en een diepte van 3 m wordt voor het grootste klapanker uit Tabel 9.3 een straal van 1,24 m gevonden en een maximale zetting van 23 mm.

Bij ankers die onder een flauwere hoek zijn ingebracht (bv 18 graden zoals uit de ontwerp berekeningen blijkt) dan is de diepte onder de fundering slechts 2 m. De geschatte zettingen op het niveau van de poeren is dan is de straal 0,82 m en de zakking 53 mm.

Als de ankers dicht bij elkaar zijn geplaatst en wat dieper, dan gaan de zettingstroggen van de ankers elkaar overlappen en ontstaat een 2D situatie, zoals die bij de tunnelbouw wordt beschouwd. Het volume per anker moet dan worden opgevat als een verdeeld volume per meter. Voor de situatie waarbij de ankers hart-op-hart 1,8 m zijn gemonteerd geeft het grootste anker een volumeverandering van 0,056 m³/1,8 m = 0,031 m³/m.

De formules uit Figuur 9.5 luiden dan:

$$\Delta V = S_{max} \cdot i \cdot \sqrt{2\pi}$$

Vergelijking 5-2

$$i = 0,28z - 0,1$$

$$R_{mv} = 2,5i$$

Hierbij is R_{mv} de halve breedte van de zettingstrog en S_{max} als de maximale zakking (vergelijkbaar met de eerder gebruikte δ).

Voor de situatie $z = 2$ m wordt nu gevonden $i = 0,46$ m, $S_{max} = 0,027$ m = 27 mm en $R_{mv} = 1,15$ m. Voor de situatie met $z = 3$ m wordt nu gevonden $i = 0,74$, $S_{max} = 0,017$ m = 17 mm en $R_{mv} = 1,85$ m.

Vergeleken met de 3D waarden hierboven is dit aanzienlijk lager. Het verschil ontstaat doordat in dit model de zakking over een grotere breedte (beschreven door R_{mv}) wordt gespreid. De spreidingshoek α is in het 3D model erg laag gekozen, de praktijkervaring met tunnelbouw suggereert dat deze waarde hoger is. Voor $z = 3$ m wordt bijvoorbeeld voor de hoek gevonden $\alpha = 32^\circ$. Bij deze spreidingshoek geeft de 3D beschouwing een zakking van 23 mm bij een ankerdiepte van 2 m en 10 mm bij een ankerdiepte van 3 m.

Het 2D model geeft een zakking die omgekeerd evenredig is met de diepte van het anker, terwijl het 3D model een zakking geeft die omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de diepte van het anker. Bij diepe ankers zal het 2D effect gaan overheersen, omdat de invloedgebieden gaan overlappen.

De werkelijke waarden van deze afgeschatte zettingen op het niveau van de poeren is erg onzeker omdat er een paar grove aannamen zijn gedaan, zoals met name de geschatte volume verandering van het anker, waarover nauwelijks iets bekend is. Ook is in deze berekening uitgegaan van een deklaag (opgebracht zand en veen) van 2 meter en dat een poer op 2 meter

onder maaiveld staat. De funderingsdiepte en dus de verticale afstand van het anker tot de onderkant van de poer heeft grote invloed op de uitkomst. Deze berekeningen geven echter wel aan dat daar waar de ankers zeer dicht de panden naderen (lees tot zeer nabij de voorgevel of zelfs onder het huis) het aannemelijk is dat hierdoor funderingen aan ongelijke zettingen onderhavig zijn geweest en schade als gevolg hiervan mogelijk is.

Dit moet per individueel pand specifiek nader onderzocht worden. In het algemeen is het waarschijnlijk dat dit mechanisme niet is opgetreden als de horizontale afstand tussen de ankers en de voorgevel voldoende groot is. Voor deze hoek kan 32° worden aangehouden. Er is geen invloed geweest als de horizontale afstand geldt:

$$x_h > \frac{1}{2}b_{poer} + z \tan \alpha + 1 = 0.5b_{poer} + 0.616z + 1 \quad \text{Vergelijking 9-7}$$

Met:

z de diepte van de klapankers [z].

h de horizontale afstand tussen de klapankers en de funderingspoer [m].

b_{poer} de breedte van de funderingspoer [m].

Om de voorzijde van funderingspoer te bepalen wordt verondersteld dat deze 0,4 m (ongeveer twee steens) voor de muur uitsteekt. Dan geldt dus $0,5 \cdot b_{poer} = 0,4$ m. De extra 1 m is in rekening gebracht omdat bij de meest kritieke situatie van een ondiepe fundering een extra marge wenselijk is. De gekozen waarde is arbitrair. Maar door deze constante toe te voegen wordt bij een diepere locatie van de klapankers de marge kleiner, maar ook de verwachte zetting wordt kleiner en gelijkmatiger tussen de poeren verdeeld. Dit betekent dat bij een ankerdiepte van 2 m onder de bovenzijde van de zandlaag de horizontale afstand kleiner dan 2,6 m moet zijn en bij diepte 3 m onder de bovenzijde van de zandlaag de horizontale afstand kleiner dan 3,2 m moet zijn. Tussen deze afstanden geeft het aanspannen van de klapankers een zetting van de funderingsgrondslag die maximaal is als het anker zich recht onder de fundering bevindt.

	z [m]	2	2	3	3
Type anker	ΔV [m³]	2D [mm]	3D [mm]	2D [mm]	3D [mm]
MR-1	0,009	9	4	4	3
MR-SR	0,024	23	12	10	7
SR-2	0,056	53	27	23	17
afstand [m]		2.2	2.6	2.6	3.2

Tabel 9.4 Overzicht berekeningsresultaten zakkingen klapankers

Tabel 9.4 geeft een overzicht van berekeningsresultaten. Voor de dieptes 2 m en 3 m zijn de zakkingen en spreidingsgebieden weergegeven. Als de grote klapankers voldoende dicht onder de fundering worden geplaatst, zijn de verwachte maaiveldzakkingen zo groot dat schade hierdoor aannemelijk is.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl