EINDRAPPORT
T540

Monitoring in de praktijk

Ervaringen grote infraprojecten

Nederlands kennis**centrum**
voor **ondergronds bouwen** en
ondergronds ruimtegebruik

Ook voor ons als commissieleden was het verrassend en inzichtelijk om te zien hoeveel we van elkaar kunnen leren. Gedeelde conclusie was: "Als we deze kennis eerder hadden gehad, dan hadden we onze eigen projecten toch nog slimmer ingericht."

Inhoudsopgave

1 Inleiding 9
1.1 Belang van vastleggen praktijkervaringen 9
1.2 Wat is monitoring? 9
1.3 Leeswijzer 10
1.4 Voor wie is deze publicatie bedoeld? 10
2 Geleerde lessen 11
2.1 Nulsituatie 11
2.2 Risicoverdeling 12
2.3 Samenwerking 12
2.4 Omgeving 13
2.5 Verantwoordelijkheden 14
2.6 Instrumenten 15
2.7 Data en informatie 16
2.8 Nauwkeurigheid 16
2.9 Meetfrequenties 17
2.10 Extra informatie 17
3 Boorgedeelte Noord/Zuidlijn 19
3.1 Inleiding 19
3.1.1 De boortunnels van de Noord/Zuidlijn 19
3.1.2 Scope van de monitoring 20
3.2 Voorbereiding 20
3.2.1 Oorzaken van zakkingen bij boren 20
3.2.2 Ontwerpkeuzes en -middelen 21
3.2.3 Predicties en zakkingsprestatie-eisen 23
3.2.4 Monitoringsfilosofie 25
3.3 Techniek 30
3.3.1 Het meetsysteem en het monitoringplan 30
3.3.2 Verwerking van de metingen 33
3.3.3 Visualisatie en distributie van informatie 35
3.4 Praktijkervaring 35
3.4.1 Ervaringen met het monitoringssysteem 36
3.4.2 Bewaking zakkingen 37
3.4.3 Optimalisatie van het boorproces 39
3.4.4 Communicatie 39
4 Diepe bouwputten Noord/Zuidlijn 43
4.1 Inleiding 43
4.2 Monitoring bij de diepe stations Noord/Zuidlijn 43
4.2.1 Monitoring van deformaties van gebouwen 44
4.2.2 Monitoring van deformaties van de ondergrond 48
4.2.3 Monitoring van lekkages en de gevolgen 50
4.2.4 Monitoring vriesproces wanden en herstart ontgraven 53
4.2.5 Monitoring ontgraven station Vijzelgracht tot het diepste niveau 53
4.2.6 Monitoring laatste ontgravingsslag station Rokin 57
4.3 Conclusies en geleerde lessen 63

5 Spoorzone Delft 65
5.1 Inleiding 65
5.1.1 Projectbeschrijving 65
5.1.2 Beheersing deformaties gebouwen 66
5.1.3 Beheersing deformaties trein- en tramsporen 68
5.1.4 Beheersing grondwaterstanden 68
5.2 Monitoringsfilosofie en -strategie 68
5.2.1 Algemeen 68
5.2.2 Controle rekenmodel 69
5.2.3 Vervormingsmetingen 69
5.2.4 Fasering monitoring 71
5.2.5 Procesbeheersmaatregelen 72
5.2.6 Grenswaarden monitoringspunten 75
5.2.7 Planning en meetfrequentie 76
5.3 Opbouw monitoringssysteem 77
5.3.1 Inclinometers 77
5.3.2 Peilbuizen 78
5.3.3 3D-laserscannen 80
5.3.4 Lintvoegmetingen 80
5.3.5 Robotic total stations en miniprisma's 80
5.3.6 Zettingsboutjes 81
5.3.7 Crosshole sonic logging 81
5.3.8 Dataverwerking en -visualisatie 83
5.4 Praktijkervaring 83
5.4.1 Nulmetingen 84
5.4.2 Validatiemetingen 87
5.4.3 Horizontale gronddeformaties met inclinometers 90
5.4.4 Deformaties van gebouwen door middel van miniprisma's 93
5.4.5 Deformaties van het bestaand spoor met miniprisma's 100
5.5 Optimalisaties monitoringsproces door voortschrijdend inzicht 103
5.5.1 Monitoring tussenfase Phoenixstraat 103
5.5.2 Monitoring tweede fase 107
5.6 Conclusie 114
6 A2 Maastricht 115
6.1 Inleiding 115
6.1.1 De Groene Loper 115
6.1.2 De tunnel 115
6.2 Voorbereiding 116
6.2.1 Grondwater: invloed van de Maas 116
6.2.2 Waterwinningen 116
6.2.3 Opstuwingsrisico door de tunnel 117
6.2.4 Monitoring voorafgaand aan en tijdens de bouw 117
6.3 Observational method 118
6.3.1 Aanleiding 118
6.3.2 Opzet 119
6.3.3 Monitoringsprogramma en ontgravingswijze 119
6.3.4 Monitoringstechnieken 121
6.3.5 Waterdrukken 124
6.4 Praktijkervaring 125

BIJLAGE A Spoorzone Delft 131
A.1 Fasering in de settlement risk assessment 131
A.2 Grenswaarden en deformaties Phoenixstraat fase 1 132
A.3 Overschrijdingen Westvest 5A 134
A.3.1 Oorzaak 134
A.3.2 Plan van aanpak vervolgproces 135
A.3.3 Monitoring vervolgproces 136
A.4 Overschrijdingen bestaand stationsgebouw 137
A.4.1 Oorzaak 137
A.4.2 Plan van aanpak vervolgproces 138
A.4.3 Monitoring vervolgproces 138
BIJLAGE B A2 Maastricht 141
B.1 Geologische beschrijving 141
B.1.1 Gesteenteregio's in Nederland 141
B.1.2 Maastrichtse geologie: de gevolgen van gebergtevorming (tektoniek) 141
B.1.3 Geohydrologie en sterkte van kalksteen 143
B.1.4 Grondonderzoek vooraf 146
B.1.5 Grondonderzoekstechnieken 147
B.2 Grondwatermonitoring door opdrachtgevers 148
B.2.1 Inleiding 148
B.2.2 Waarom vroeg starten met verzamelen grondwatergegevens? 148
B.2.3 Projectfasen: wanneer welke stap? 148
B.2.4 Aandachtspunten hoeveelheid gegevens 150

Referenties 155
Colofon 159

1 Inleiding

1.1 Belang van vastleggen praktijkervaringen

Binnen CUR/COB zijn in de periode 2009-2015 aanzienlijke inspanningen geleverd om duidelijke richtlijnen/aanbevelingen op te stellen met betrekking tot het ontwerpen van, de omgevingsbeïnvloeding door en het monitoren van bouwputten in stedelijke omgeving. Ook werd er aandacht besteed aan de observational method. Dit resulteerde in onder andere de onderstaande documenten:

- CUR 223 - Richtlijn meten en monitoren van bouwputten (2010) [1].
- Handreiking observational method (2015) [2].
- COB F530 - Aanbevelingen voor het ontwerp van bouwkuipen in stedelijke omgeving (2012) [3], en bijbehorende achtergronddocumenten.

Men is zich er ook van bewust dat de richtlijnen/aanbevelingen niet in beton gegoten zijn, maar eerder als een breed gedragen advies gezien moeten worden. Dit blijkt uit onderstaand uittreksel uit een van de bovengenoemde documenten:

> *De commissie is er zich tevens van bewust dat met deze richtlijn 'Meten en monitoren van bouwputten' een eerste aanzet tot een gestructureerd monitoringsproces beschikbaar is. De commissie beveelt daarom de bij het proces betrokken partijen vervolgtrajecten in het kennisdomein bouwputten aan: Meten en monitoren van bouwputten in de praktijk: stimuleer de komende jaren de doorwerking van de richtlijnen in de praktijk en bevorder brede toepassing in alle fasen van het proces. Volg de met de richtlijn opgedane ervaringen en draag zorg voor het tijdig actualiseren en aanpassen van de richtlijn.*

Bij drie onderling wezenlijk verschillende grote infrastructuurwerken in stedelijk milieu werd de monitoring uitgewerkt volgens de hierboven genoemde richtlijnen/aanbevelingen. Tevens werd de observational method toegepast binnen deze projecten, zij het meestal als '*best way out*'-validatie voor in eerdere uitvoeringsstappen tegenvallende resultaten. Uitzondering hierop is het project A2 Maastricht waarbij de observational method reeds vanaf het ontwerpproces werd toegepast. Ondanks dat de monitoring van elk project gebaseerd was op dezelfde richtlijnen/aanbevelingen, waren de monitoringssystemen en de verkregen resultaten onderling soms sterk verschillend. Op diverse punten werd geconstateerd dat de monitoring geoptimaliseerd kon worden. Experts van deze projecten hebben daarom samengewerkt met het COB om hun ervaringen openbaar beschikbaar te stellen voor alle belanghebbenden: daarmee wordt voorkomen dat de geleerde lessen uitsluitend blijven hangen binnen een select groepje van aan deze projecten verbonden mensen, en dat grote binnenstedelijke projecten in de nabije toekomst weer van begin af aan moeten beginnen.

De drie projecten zijn:

- Noord/Zuidlijn Amsterdam (van dit project wordt zowel de monitoring van het boorproces als de monitoring tijdens de bouw van de diepe stations beschouwd).
- Spoorzone Delft.
- A2 Maastricht.

1.2 Wat is monitoring?

Voor de definitie van monitoring kunnen we teruggrijpen naar de CUR-publicatie 223, *Richtlijn meten en monitoren van bouwputten*, waarin wordt gesteld:

> *Monitoren is het herhaald uitvoeren van metingen aan of bij een constructie om beslissingen te kunnen nemen ten aanzien van de verdere bouw- en/of beheerfasen.*

Deze definitie dekt dus ook de precontractuele monitoring en de monitoring binnen een observational-methodaanpak.

Monitoring is tevens sterk verbonden met de communicatie met de buitenwereld, vooral bij projecten in stedelijke omgeving. Voorliggend rapport wil dan ook advies geven over de manier waarop monitoringsresultaten het best met de buitenwereld gecommuniceerd kunnen worden. Deze communicatie maakt echter geen deel uit van de monitoring zelf.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstukken 3 tot en met 6 gaan in op de diverse praktijkcases die recent in uitvoering waren, dan wel nog in uitvoering zijn. De behandelde praktijkcases zijn:

- Boorgedeelte Noord/Zuidlijn (HOOFDSTUK 3).
- Diepe bouwputten Noord/Zuidlijn (HOOFDSTUK 4).
- Spoorzone Delft (HOOFDSTUK 5).
- A2 Maastricht (HOOFDSTUK 6).

In elk van deze praktijkcases komen steeds onderstaande zaken aan bod:

- Algemene beschrijving van het project en de scope van de doorgevoerde monitoring.
- De voorafgaande werkzaamheden. Hierbij wordt de (precontractuele) monitoring besproken, alsook de gehanteerde monitoringsfilosofie en resulterende monitoringsstrategie.
- De geïmplementeerde monitoringstechnieken.
- Opgedane praktijkervaringen. Hierbij worden zowel de geboekte successen als de tegenvallers besproken. Ook wordt ingegaan op de interne processen en de communicatie met allerhande partijen. Tot slot worden ook de doorgevoerde wijzigingen in het monitoringsproces gedurende de loop van het project besproken.

HOOFDSTUK 2 bevat de geleerde lessen. Hierbij wordt vooral gekeken naar die zaken die in alle/meerdere praktijkcases terugkeren en die nuttig kunnen zijn als advies naar toekomstige bouwprojecten waarbij monitoring een belangrijke rol gaat spelen.

In de bijlagen worden extra toelichtingen gegeven die ten behoeve van de leesbaarheid uit de hoofdtekst zijn weggelaten en die de commissie toch als waardevolle informatie beschouwt.

1.4 Voor wie is deze publicatie bedoeld?

Deze publicatie is geschreven voor iedereen die aan opdrachtgever- of opdrachtnemerszijde betrokken is bij het risicomanagement van (grote) ondergrondgerelateerde projecten. Bent u bestuurder, projectdirecteur of beleidsambtenaar en wilt u een eerste 'gevoel' krijgen bij dit onderwerp? Lees dan vooral deze inleiding en HOOFDSTUK 2. Bent u specialist op het gebied van monitoring? Lees dan vooral alle praktijkcases, ook als uw project bijvoorbeeld geen bouwput of boortunnel betreft.

2 Geleerde lessen

Monitoring vraagt om een systematische en strategische aanpak. CUR223 en F530 nemen een risicogestuurde aanpak als basis. Bij de grote infraprojecten in Amsterdam, Delft en Maastricht is gebleken dat dit de juiste aanpak is. Wat, wanneer, waar en hoe frequent metingen worden uitgevoerd, hangt inderdaad af van een risicogebaseerde aanpak en inzicht in de (geo)technische faalmechanismen. Hieronder staan de lessen uit de projecten weergegeven.

2.1 Nulsituatie

Zorg voor een zo volledig mogelijk en deskundig beeld van de nulsituatie.

Het wordt aanbevolen om zo lang als mogelijk, en over het gehele projectgebied, de nulsituatie te monitoren. Dit is van belang voor een volledig en tijdig inzicht in de risico's en om later een duidelijk onderscheid te kunnen maken tussen verschijnselen die veroorzaakt worden door bouwactiviteiten binnen het project en verschijnselen die te wijten zijn aan andere oorzaken. Dit kunnen dagelijkse, seizoensgebonden of zelfs meerjaarse oorzaken zijn, maar ook discrete (in de tijd) oorzaken zoals andere bouwactiviteiten. Afhankelijk van het betreffende risico (gerelateerd aan bijvoorbeeld grondwatervariaties, extreme neerslag, hoogwater) moet een geschikte periode voor de nulmeting worden gekozen. Hierbij moet men qua looptijd al gauw aan minimaal een jaar denken om zodoende alle seizoenen te omvatten.

Deze nulsituatiemonitoring zal tijdig en daardoor zeer waarschijnlijk door de opdrachtgever opgezet moeten worden. In het meest optimale geval is de rapportage van de nulsituatiemonitoring beschikbaar bij het begin van de aanbiedingsfase. Hierdoor krijgen de aanbieders enig historisch inzicht in de projectsituatie.

Het in de gaten houden van het volledige projectgebied is dikwijls een aspect waar te makkelijk over wordt gedacht. Soms is de bouwlocatie nog niet beschikbaar voor gunning, maar ook een onoordeelkundig opzetten van de nulsituatiemonitoring, dan wel een verkeerde beslissing om economische redenen, kan hieraan ten grondslag liggen. Het projectgebied moet op basis van twee analyses worden vastgesteld. Ten eerste op basis van het te verwachten invloedsgebied vanuit de mechanismen en risico's. Vervolgens kan op basis van de omgevingssensitiviteit worden besloten om de nulmeting (deels) voor een groter gebied uit te voeren.

Als er te veel onzekerheid bestaat omtrent de situatie die de opdrachtnemer daadwerkelijk gaat aantreffen, is het aanbevolen om een transparante afspraak te maken tussen opdrachtgever en opdrachtnemer over de bandbreedte die aangenomen moet worden tijdens de prijsvormingsfase. Met bandbreedte wordt het gebied tussen ondergrens en bovengrens rondom een verwachtingswaarde bedoeld. Bijvoorbeeld: men zegt dat de grondwaterstand NAP -0,50 meter is, maar als deze zakt tot NAP -2,0 meter of stijgt tot NAP +1,50 meter, dan heeft men recht om compensatie te vragen. Binnen de aangegeven bandbreedte heeft men geen recht op compensatie, dan had het in de aanbieding moeten zitten. Als er nadien een situatie ontstaat buiten de gehanteerde bandbreedtes, dan kan de opdrachtnemer tot een tegemoetkoming (in tijd en/of geld) verzoeken.

Naast de weergave van de ruwe meetdata moet de nulmeting een accuraat beeld geven van de omstandigheden waarbij de metingen werden uitgevoerd. Er moet door ervaren personen een evaluatie gemaakt worden waarbij de meetdata, en dan vooral de mogelijke

afwijkingen, gelinkt worden aan de heersende omstandigheden. Gezien de soms lange tijd tussen nulsituatiemonitoring en aanbieding enerzijds en de daadwerkelijke uitvoering anderzijds, moet men ook duidelijk aangeven, indien van toepassing, welke omstandigheden inmiddels gewijzigd zijn, dan wel gewijzigd zullen worden, tijdens projectrealisatie. Het ontbreken van deze informatie is dikwijls aanleiding tot discussies achteraf en claims van significante omvang. De deskundigen die de rapportage over de nulsituatie opstellen, moeten niet schromen om volledig transparant te zijn over wat je ziet en wat onverklaarbaar is. Ieder project kent afwijkende meetgegevens die met de beste wil van de wereld niet verklaard kunnen worden.

2.2 Risicoverdeling

Bespreek tussen opdrachtgever en opdrachtnemer vroegtijdig een reële risicoverdeling op basis van de resultaten van de nulsituatiemonitoring.

Bij de meeste projecten krijgen de aanbiedende partijen tijdens de aanbiedingsfase een gigantische hoeveelheid informatie vanuit opdrachtgever aangeboden. Naast eenmalige meetresultaten, zoals sonderingen, grondmechanische labproeven en sterktecriteria van constructies, worden hierbij ook herhaalde metingen over een bepaalde periode aan de aanbiedende partijen verschaft. Het gaat hier dan over deformaties van constructies, grondwaterstanden, grondwaterstromingen, trillingen, geluid, etc.

Het is van belang dat opdrachtgevers en aanbiedende opdrachtnemers reeds in de aanbiedingsfase heel concreet met elkaar afspreken hoe de risicoverdeling met betrekking tot de juistheid/volledigheid van de nulsituatiemonitoring geregeld wordt. Met andere woorden: vanaf welke achteraf gemeten waarden kan de opdrachtnemer zich beroepen op een 'onvoorziene omstandigheid' en kan hij een tegemoetkoming van de opdrachtgever verwachten?

Een goede en open onderhandeling voor contractering kan ervoor zorgen dat de opdrachtnemers geen te hoge buffer in hun prijsvorming opnemen (alle risico's bij opdrachtnemer), dan wel het risico wegnemen dat de opdrachtgever achteraf met significante budgetoverschrijdingen te maken krijgt (alle risico's bij opdrachtgever).

2.3 Samenwerking

Goed monitoren doe je samen met alle stakeholders.

Goed monitoren doe je samen. Niet alleen met het eigen projectteam, maar minimaal in samenspraak met opdrachtgever en opdrachtnemer. Succesverhalen in recente binnenstedelijke projecten tonen aan dat een gezamenlijk overleg tussen opdrachtnemer (projectleider, werkvoorbereider, uitvoerder), opdrachtgever (projectleider, specialist, toezicht), diverse vergunningshouders (bouw- en woningtoezicht, waterschappen) en verzekeringspartijen omtrent de monitoringsdata en de te nemen acties, aanleiding geeft tot een wederzijds begrip voor elkaars belangen en derhalve tot een meervoudige win-winsituatie. Een vooraf met alle partijen goed doorgesproken monitoringplan en een regulier overleg (met alle partijen) tijdens de uitvoering zijn de sleutels tot succes. Projecten met een uitgebreide monitoring, en dan vooral in binnenstedelijk milieu, zijn doorgaans gekenmerkt door een sterke relatie tussen monitoringresultaten en de daaropvolgende uitvoeringsstappen. Het mogen doorwerken volgens de voorziene procedure, dan wel het aanpassen van het bouwproces bij de vervolgstappen, wordt besloten op basis van de monitoringresultaten. Dit evaluatie- en beslissingsproces wordt gemaakt in nauw overleg tussen opdrachtgever en opdrachtnemer. Het is dan ook van belang dat

dit proces plaatsvindt met een volledige transparantie tussen beide partijen, waarbij het gezamenlijk belang van beide partijen zo goed mogelijk wordt nagestreefd. Hierbij zal dikwijls een afweging gemaakt moeten worden tussen dure, (te) robuuste oplossingen en economisch (tijd en/of geld) minder robuuste oplossingen.

Als men in situaties komt dat er mitigerende maatregelen genomen moeten worden, het uitvoeringsproces stilgelegd moet worden of met de uitvoering doorgegaan kan worden ondanks het overschrijden van een interventie- of grenswaarde, is het ten zeerste aanbevolen deze beslissing in een voldoende breed kader te nemen. Als er dan een basis van vertrouwen en overleg is, wordt dat gedeelde besluit veel haalbaarder.

2.4 Omgeving

Wees omgevingssensitief, proactief en communiceer op het juiste niveau over monitoring.

Een goede relatie tussen partijen begint met het begrijpen van elkaars belangen. Naast de reeds in de vorige les aangehaalde partijen is het ook belangrijk om de beleving van alle omwonenden binnen de projectomgeving te kennen, en proactief, open en sensitief met hen te communiceren, ook over een complex onderwerp als monitoring.

Het combineren van communicatie over op stapel staande werkzaamheden met de te verwachten hinder, en een uitleg op hoofdzaken over de manier waarop de monitoring wordt ingezet om tijdig de juiste mitigerende maatregelen te nemen, is doorgaans een goede manier om het onderwerp monitoring vast onderdeel te laten zijn van omgevingscommunicatie.

Ervaringen van vergelijkbare projecten en het bezoeken van die projecten kan ook erg helpen. Op deze manier is bijvoorbeeld geleerd dat een realistische communicatie beter werkt dan een te optimistische voorstelling van de te verwachten situatie.

Interactie toegespitst op het kennis- en betrokkenheidniveau van de ander, goede uitleg door inhoudelijke experts en herhaling van de boodschap vormen de kern van goede communicatie over monitoring. Het is bij communicatie naar de omgeving niet verstandig om te verzanden in een overdaad aan informatie die door de niet-deskundige betrokkenen niet in het juiste perspectief geplaatst kan worden. Als uit de omgeving specifieke vragen komen, bijvoorbeeld over bestaande marges in de meetdata, gehanteerde veiligheidsfactoren en toelaatbare schadecriteria, wordt aanbevolen dit in een een-op-eensituatie (bijvoorbeeld met keukentafelgesprekken) of in klein gezelschap te delen, zodat er direct gereageerd kan worden op onduidelijkheden.

Een centraal schadeloket waar alle meldingen samenkomen, is voor de omgeving van groot belang. Een digitaal systeem dat een onmiddellijke koppeling kan maken tussen de binnengekomen melding, de activiteiten in het veld en de op die locatie meest recente monitoringsdata is onontbeerlijk. De sociale vaardigheden van de medewerkers bij dit loket en de samenwerking van hen met de omgevingsmanagers en technisch experts kan veel goodwill opleveren, terwijl een te strikt juridische benadering averechts kan werken. Op dit gebied zijn recent positieve ervaringen opgedaan met een soepele benadering van klachten. Er heerst nog vaak vrees dat dit resulteert in vele onterechte claims en uitputting van het budget dat hiervoor gereserveerd is. Bij de in dit rapport genoemde projecten is er juist altijd sprake geweest van onderuitputting van het hiervoor beschikbare budget. Het is een uitdagende opdracht om het onderscheid te maken tussen de waakzame burger die net de eerste cruciale melding maakt die wijst op een afwijkende situatie, en derden die enkel azen op een financiële tegemoetkoming, ongeacht het feit of de door hun gemelde

schade daadwerkelijk aan de bouwwerkzaamheden is gerelateerd. Een open en positieve grondhouding is daarbij de basis. We moeten ons realiseren dat beide 'types' uitzondering zijn en de meeste omwonenden gewone bezorgde burgers zijn.

Tot slot mag men niet over het hoofd zien dat sommige contractueel gestelde eisen in bepaalde gevallen nog verder aangescherpt moeten worden vanuit de specifieke randvoorwaarden die bepaalde bedrijven of instellingen in de omgeving aan het bouwproject stellen. Denk aan ondernemingen met trillingsgevoelige apparatuur. De opdrachtgever moet deze eisen zo goed als mogelijk in kaart brengen voorafgaand aan de aanbiedingsfase, maar een controle op de volledigheid tijdens het opstellen van het monitoringsplan strekt tot aanbeveling. Ook hier moet kritisch beschouwd te worden of men als opdrachtnemer niet overvraagd wordt.

2.5 Verantwoordelijkheden

Leg de verantwoordelijkheid van de monitoring bij de juiste partijen.

Het in CUR-publicatie 223 gestelde houdt stand en is herkend in alle praktijkprojecten:

> *De verdeling van risico's in het algemeen en de verantwoordelijkheden voor monitoring in het bijzonder zijn afhankelijk van de contractvorm. Aanbevolen wordt dat de partij die de ontwerpkeuzes heeft gemaakt ook verantwoordelijk is voor het ontwerp van de monitoring. Dit houdt grofweg in dat de opdrachtgever bij een traditioneel contract bepaalt welke monitoring moet worden uitgevoerd en dit vervolgens eventueel als onderdeel van het contract kan uitbesteden aan de opdrachtnemer. Bij een geïntegreerd contract ligt de monitoring bij de opdrachtnemer en deze is zelf verantwoordelijk voor opzet en uitvoering ervan.*

Aangezien recente (grote, binnenstedelijke) projecten doorgaans in een D&C-, DBM- of zelfs DBFM[1]-kader worden uitbesteed, kan bovenstaande tot discussies leiden als het gaat over monitoring van de omgeving. Wanneer de monitoring van de omgeving volledig aan de opdrachtnemer wordt overgelaten, loopt men het risico dat het monitoringssysteem dusdanig wordt ingesteld dat er enkel aan de minimale aantoonverplichting voor een beheerste uitvoering wordt tegemoetgekomen. Dit, terwijl monitoring ook heel belangrijk is om een goede communicatie met en draagvlak in de omgeving van het project te verkrijgen.

Daarom is het wenselijk als de opdrachtgever de doelen en eisen voor de monitoring zo expliciet mogelijk omschrijft. Dit is echter al snel in tegenspraak met het karakter van geïntegreerde contracten, waarbij door de opdrachtgever niets specifiek wordt voorgeschreven. Het risico bestaat dan namelijk dat hierdoor ook ontwerp en uitvoering van het project zelf worden voorgeschreven. Het lijkt echter wel mogelijk om voor de omgevingsmonitoring specifiek te zijn over de volgende aspecten: minimaal aantal meetpunten, minimale meetfrequentie per meetpunt (per fase) en de meetnauwkeurigheid, zonder hierbij te prescriptief te zijn met betrekking tot de in te zetten meetapparatuur. Hierbij moet opdrachtgever open staan voor nieuwe ontwikkelingen binnen de monitoring die mogelijk door aanbieders worden aangereikt.

Wanneer bewust wordt ingezet op een ontwerpproces op basis van de observational method, zal de opdrachtnemer zelf zijn (aanvullende) monitoring hierop afstemmen. Een vroegtijdige overeenstemming tussen opdrachtnemer en opdrachtgever omtrent de juistheid/volledigheid van de aanvullende monitoring voor de observational method voorkomt misverstanden tijdens het verdere verloop van het realisatieproces.

1 D&C: design and construct, DBM: design, build and maintain, DBFM: design,build, finance and maintain.

2.6 Instrumenten

Kies de juiste instrumentatie en voorzie voldoende redundantie.

Men moet er steeds voor waken dat men het best passende equipment inschakelt om een gewenste grootheid te monitoren. Het komt niet zelden voor dat men via 'een omweg' bepaalde zaken gaat meten en hierdoor veel aan efficiëntie verliest. De combinatie van *robotic total stations* (RTS'en) en vooraf aangebrachte prisma's is een goed functionerend systeem om de bewegingen van constructies te monitoren. Het vertalen van de meetwaarden naar prestatie-eisen moet echter goed uitgedacht worden en eenvoudig te implementeren zijn. Een onmiddellijke omzetting van de meetwaarden in interpreteerbare prestatie-eisen is hierbij van groot belang.

De meetruis van het gehanteerde equipment moet ook in relatie staan tot de verwachte meetwaarden. Zo blijken inclinometers beter geschikt om horizontale gronddeformaties naast flexibele damwandconstructies te monitoren dan naast de veel stijvere diepwandconstructies (zeker tijdens de eerste ontgravingsfasen).

Ook de kans op beschadiging moet in overweging genomen worden bij het kiezen van het monitoringsequipment. Men kan beter opteren voor het meten van reflectorloze meetpunten aan het maaiveld dan het installeren van zakbakens/fenomarkers in het publieke domein. Ook peilbuizen zijn heel fragiele meetapparaten, die niet zelden ten gevolge van het eigen uitvoeringsproces onklaar raken. Bij het opstellen van het monitoringsplan met de locaties van de peilbuizen moet men dan ook nadenken hoe 'blind' men dreigt te worden bij het uitvallen van een of meerdere peilbuizen, en welke redundante peilbuizen men hiervoor beter zou kunnen aanbrengen. Deze redundantie geldt ook bij het bepalen van de onderlinge afstanden van de RTS'en. Welk gebied kan men nog steeds dekkend gaan monitoren bij het uitvallen van een RTS? Het voorzien van een reservemeetsysteem door middel van handmatig in te meten bouten is te allen tijde een *must*, daar men de voortgang van het bouwproces niet wil laten afhangen van een technische storing.

Een robuust systeem met veel verschillende soorten metingen, maakt onderling vergelijken mogelijk, zodat meer betrouwbaarheid wordt verkregen. Het is dus nuttig om veel verschillende typen metingen te hebben. De verschillende metingen vergroten namelijk het inzicht in de situatie en kunnen helpen om afwijkende meetresultaten te verklaren. Tegelijkertijd is het echter ook zo dat er met een toenemende hoeveelheid metingen en data, een toenemende kans op ruis is, waardoor discussies kunnen ontstaan.

Nauwkeurige analyse van continue registratie van de waterspanning kan een lekkage snel zichtbaar maken. Dit is afhankelijk van waterstroming en doorlatendheid van aquifers buiten de ontgraving. Hoe kleiner de doorlatendheid, hoe minder goed met peilbuismonitoring een lekkage is vast te stellen. Als de peilbuizen geen lekkage aangeven, is het niet gezegd dat deze er niet is; andersom is het wel zo dat als er een lekkage is, deze in de metingen te zien zal zijn.

Activiteiten en hulpmiddelen om het risicobewustzijn bij de mensen in de bouwput te vergroten, hebben een groot positief effect op de totale risicobeheersing. Deze mensen zorgen voor directe observaties, die in geval van incidenten vaak sneller zijn dan welk systeem ook.

2.7 Data en informatie

Zet meetdata om in leesbare informatie.

Geautomatiseerde monitoringsystemen en geavanceerde computers maken het mogelijk om grote hoeveelheden gegevens te registreren en op te slaan. Dit is echter geen garantie op een goed proces. Het omvormen van deze data naar bruikbare informatie moet gebeuren door deskundig personeel. Het gebeurt niet zelden dat reguliere monitoringsrapportages, vanwege een contractuele verplichting, door onvoldoende ervaren mensen in sneltempo worden afgeraffeld zonder dat hierbij enige meerwaarde aan de ruwe meetdata wordt toegevoegd. Op menig bouwplaats komt men vroeg of laat tot de constatering dat de inzet van een (geotechnisch) onderlegde site-engineer de moeite loont.

De beoogde doelstelling van het monitoringsproces en de verschillende invloedsfactoren moeten ook breed gecommuniceerd worden binnen de projectorganisatie. Afwijkende meetwaarden kunnen dikwijls verklaard worden aan de hand van gewijzigde (kortdurende) randvoorwaarden tijdens het bouwproces. Een gedisciplineerde registratie van deze zaken in het logboek en de koppeling hiervan met de meetdata kunnen een hoop inzicht verschaffen. Het omzetten van de brij aan meetdata in (ook voor niet-geotechnici) leesbare informatie is cruciaal. Dit zorgt voor een level playing field tijdens overleggen en in communicatie met stakeholders buiten de projectorganisatie.

Ook de daadwerkelijke voortgang buiten kan nog wel eens afwijken van de voortgang conform de projectplanning. Een correcte terugkoppeling aan de monitoringssite-engineer is onontbeerlijk.

2.8 Nauwkeurigheid

Stem meetnauwkeurigheid en te hanteren marges op elkaar af.

Voor een goede monitoring is het vaststellen van grenswaarden waarbij maatregelen genomen moeten worden van groot belang. Hiervoor bestaan grofweg twee 'scholen'. Bij de eerste school worden resultaten uit ontwerpberekeningen gebruikt om per uitvoeringsfase de grenswaarden vast te stellen. Bij de tweede school worden grenswaarden vastgesteld op basis van de vervormingen die maximaal toelaatbaar zijn.

Voordeel van de eerste aanpak is dat eventuele afwijkingen tijdig opgemerkt worden en het bouwproces tijdig kan worden bijgesteld om schade in de omgeving te voorkomen. Er zijn echter ook nadelen. Dikwijls worden de resultaten uit de predictieberekeningen per bouwfase als grenswaarden ingevoerd in een geautomatiseerd monitoringssysteem. Wanneer deze grenswaarden dan ook nog eens per bouwfase worden ingevoerd en men bovendien hieraan ook signaal- en interventiewaarden gaat koppelen, kunnen de 'toegelaten' meetwaarden dermate klein worden dat ze zelfs kleiner worden dan de meetruis van het meetequipment. Bij geautomatiseerde monitoringssystemen is het bovendien ook doorgaans zo dat bij overschrijding van een signaal-, interventie- en/of grenswaarde er een melding uitgestuurd wordt naar vooraf gekozen personen/functiehouders en/of een stoplichtensysteem met kleurcodes wordt geactiveerd.

Als afwijkingen worden geregistreerd ten opzichte van de predictieberekeningen, zal er doorgaans nog een ruime marge zijn tussen de gemeten situatie en de ontoelaatbare situatie waarbij schade kan worden verwacht. Daarom zal een strikte opvolging van het protocol (= interveniëren bij bereiken interventiewaarde en stilleggen uitvoering bij overschrijding grenswaarde) aanleiding geven tot onnodig oponthoud en frustratie bij de uitvoering. Bovendien zal er na een paar keer een gewenning ontstaan bij de uitvoering dat een melding van een overschrijding achteraf toch niet kritisch blijkt te zijn.

Wanneer er daarentegen enkel op basis van de daadwerkelijke grenswaarde wordt gemonitord (de waarde waarbij ontoelaatbare schade verwacht kan worden), wordt er al snel een gevoel van valse veiligheid gegenereerd. Afwijkingen ten opzichte van de voorspellingen worden niet vroegtijdig opgepakt, waardoor te laat mitigerende maatregelen worden ingevoerd.

Het wordt daarom ten zeerste aanbevolen om alle betrokken personen heel duidelijk in te lichten over de manier waarop het monitoringssysteem is opgezet. Gezien de mogelijke gevolgen is een signalering per bouwfase gerelateerd aan waarden uit de predictieberekeningen het meest zinvol voor het sturen op de bouwplaats (het interne proces), terwijl in de externe communicatie (eventueel additioneel) een signalering gerelateerd aan daadwerkelijke grenswaarden vaak eenduidiger is.

2.9 Meetfrequenties

Pas handmatige meetfrequenties aan als dat moet.

Naast de automatische monitoring vinden veel discontinue, handmatige metingen plaats. Doordat deze metingen discontinu plaatsvinden, kan bij één afwijkende meting niet direct gesteld worden dat dit ook daadwerkelijk een afwijking betreft. Het kan daardoor gebeuren dat de meetruis van deze handmatige metingen aanleiding geeft tot een te snel, dan wel te laat invoeren van een mitigerende maatregel. In deze gevallen is het frequenter uitvoeren van de handmatige meting, onafhankelijk van de voortgang van het bouwproces, nuttig om zodoende de trendlijn inzichtelijk te maken. Hierbij moet men de uitvoering overtuigen van het nut van deze extra meetsessies die kunnen conflicteren met de opgestelde werkplanning. Als de uitvoering al stelselmatig is betrokken bij het monitoringsoverleg, dan zal het eenvoudiger zijn hier draagvlak voor te vinden.

2.10 Extra informatie

Maak waar mogelijk gebruik van 'gratis' informatie.

Dikwijls gebruikt men enkel harde monitoringsgegevens om zich een beeld te vormen omtrent een bepaalde situatie, terwijl er ook veel 'gratis' informatie beschikbaar is. Het gaat hier bijvoorbeeld om gegevens uit de dagregistratie, maar ook uit bronnen zoals het DINOloket, Buienradar en het KNMI, die men kan koppelen aan diverse karakteristieken van de ondergrond en/of structuur. De monitoringsverantwoordelijke moet zelf actief op zoek naar dit soort bronnen, maar de opdrachtgever en opdrachtnemer moeten ook onderling zelf actief beschikbare bronnen delen.

3 Boorgedeelte Noord/Zuidlijn

3.1 Inleiding

Bij de aanleg van de boortunnels van de Noord/Zuidlijn is veel waardevolle ervaring opgedaan met het intensief monitoren van de uitvoering van een boortunnel in een stedelijke omgeving. Deze monitoring vormde een onmisbaar instrument voor het beheersen van het risico op schade als gevolg van de werkzaamheden. In dit document zijn de, met name praktische, ervaringen verzameld en vergeleken met relevante aanbevelingen die de afgelopen jaren zijn gebundeld in een aantal rapporten over ondergronds bouwen in een stedelijke omgeving en de monitoring daarvan (referenties [1], [2] en [3]). Daarnaast worden nieuwe aanbevelingen geformuleerd voor de monitoring van boortunnels, waarbij ook gebruik wordt gemaakt van input van andere projecten, waaronder de Hubertustunnel. Het resultaat is de formulering van best practices voor het monitoren van boortunnels.

3.1.1 De boortunnels van de Noord/Zuidlijn

De Noord/Zuidlijn is een nieuwe metrolijn in Amsterdam. De lijn vormt een verbinding tussen de belangrijke centra van de stad in Amsterdam-Noord, het centrum en in het zuidelijke deel van de stad. De boortunnel vormt een belangrijk deel van de lijn. Hij overspant een afstand van circa 3,6 kilometer en loopt dwars door de binnenstad. De twee geboorde tunnelbuizen van 5,82 meter diameter, één voor elke richting van de toekomstige metrolijn, liggen grofweg tussen station Amsterdam Centraal en het congrescentrum Amsterdam RAI. Over dit traject wordt de tunnel onderbroken door drie diepe stations die de tunnels verdelen in vier baanvakken. De totale geboorde lengte bedraagt hierdoor ruim 6,2 kilometer (twee keer 3,1 kilometer).

De ligging van de tunnels wordt gekenmerkt door de randvoorwaarden die voortkomen uit de stedelijke omgeving. Om te beginnen liggen de tunnels diep: circa 20 tot 30 meter onder straatniveau en dus ook ver onder grondwaterniveau. Ook liggen de tunnels in zachte grond, grotendeels in zand maar ook voor een significant deel in (Eem)klei. De tunnels volgen vrijwel overal het stratenpatroon, wat zeer krappe boogstralen vereist (tot wel 200 meter radius). Op een deel van het tracé in de negentiende-eeuwse wijk De Pijp werd echter diep ónder op palen gefundeerde huizen geboord; op dat moment een unicum in Nederland. Over vrijwel het gehele tracé werd zeer dichtbij en zelfs onder zeer diverse, vaak monumentale, en vrijwel altijd zeer zakkingsgevoelige bebouwing geboord. Het voorkomen van schade aan belendingen had de hoogste prioriteit bij zowel het ontwerp als de uitvoering van de boortunnel.

Hoewel de primaire maatregel ter voorkoming van schade in de omgeving bestond uit een zeer beheerst boorproces, werden op in totaal zeven locaties extra maatregelen genomen om een te grote invloed van het boren op belendingen (letterlijk) te compenseren. Het ging hierbij om *compensation grouting*: het met lansen ónder de fundering van kwetsbare gebouwen injecteren van mortel (grout) om te grote zakkingen door het boren ongedaan te maken. Compensation grouting werd bij de Noord/Zuidlijn toegepast bij markante gebouwen zoals de Bijenkorf en de Munttoren, maar ook op kwetsbare locaties zoals de brug over het Amstelkanaal en onder enkele huizenblokken in De Pijp.

De uitvoering van de tunnels vond plaats tussen maart 2010 en december 2012. In die periode zijn de in totaal acht tunnelbuizen geboord op de vier baanvakken. In 2010 werden vanaf het Damrak, tegenover station Amsterdam Centraal, in zuidelijke richting achtereenvolgens twee buizen geboord tot station Rokin. Vanaf 2011 gingen de boorwerkzaamheden verder vanaf het veel zuidelijker gelegen Scheldeplein. Vanaf deze locatie werd in noordelijke

richting geboord, terug naar de binnenstad. In 2011 zijn de westelijke tunnelbuizen tussen het Scheldeplein en station De Pijp en vervolgens tussen stations De Pijp en Vijzelgracht geboord. In de eerste helft van 2012 zijn de oostelijke tunnelbuizen tussen het Scheldeplein, station De Pijp en station Vijzelgracht uitgevoerd. In de tweede helft van 2012 zijn tot slot de beide buizen tussen station Vijzelgracht en station Rokin geboord. Er zijn twee complete boorsystemen en vier boorschilden ingezet, maar nooit tegelijkertijd.

3.1.2 Scope van de monitoring

Het monitoringssysteem van de Noord/Zuidlijn dekte meer dan de boortunnel; het werd ook gebruikt voor onder andere de aanleg van de drie diepe stations in de binnenstad en voor de werkzaamheden nabij station Amsterdam Centraal. De monitoring van die objecten had qua meettechniek en gegevensverwerking veel overeenkomsten met die van de boortunnel, maar verschilde sterk wat betreft het praktische gebruik van de ingewonnen informatie. Dit verschil komt voort uit het fundamenteel andere karakter van de werkzaamheden. Het boorproces beïnvloedt een specifiek object (gebouw) in de omgeving slechts kort (een passage duurt enkele dagen), maar passeert wel veel verschillende objecten. De werkzaamheden aan een station daarentegen duurden meerdere jaren, maar het invloedsgebied was ten opzichte van de boortunnel beperkt en statisch.

HOOFDSTUK 4 gaat in op de monitoring van diepe bouwputten van de Noord/Zuidlijn.

3.2 Voorbereiding

Bij een boortunnel in stedelijk gebied is de beheersing van het zakkingsrisico een van de belangrijkste doelstellingen voor de uitvoering. In dat opzicht wordt naadloos aangesloten op de voornaamste aanbeveling uit het F530-rapport *Bouwkuipen in stedelijke omgeving* [3] dat de beheersing van omgevingsbeïnvloeding expliciet onderdeel van de projectdoelen moet zijn. Hoewel ontwerpkeuzes en de wijze van uitvoering van het boorproces belangrijk zijn, is de omgevingsbeïnvloeding alleen te beheersen als er goede feedbackinformatie beschikbaar is om het proces te bewaken en te optimaliseren. Daarvoor is een uitgebreid en effectief monitoringssysteem noodzakelijk. In deze paragraaf wordt op basis van ervaring aangegeven welke monitoringsinformatie nodig is om een boortunnel in stedelijk gebied beheerst uit te voeren. Daarvoor wordt ingegaan op de bron van de omgevingsbeïnvloeding (PARAGRAAF 3.2.1), de mogelijkheden om de mate van beïnvloeding door ontwerp en uitvoering te beperken (PARAGRAAF 3.2.2), de rol van predicties (PARAGRAAF 3.2.3) en het daadwerkelijk gebruiken van monitoringsdata (PARAGRAAF 3.2.4).

3.2.1 Oorzaken van zakkingen bij boren

Het boren van een tunnel gaat altijd gepaard met enige omgevingsbeïnvloeding in de vorm van zakkingen van de grond boven de tunnel. De mate waarin dit gebeurt, bepaalt het risico op schade aan gebouwen, kabels en leidingen en andere objecten nabij de tunnel. Bij die risicobeschouwing wordt nadrukkelijk onderscheid gemaakt tussen de onvermijdelijke maar geringe zakkingen door het reguliere boorproces en de zeer kleine kans dat, als gevolg van een calamiteit, een grote lokale verzakking ontstaat. Ook dit komt terug als aanbeveling in [3].

Volumeverlies bij een regulier boorproces

Zakkingen als gevolg van het reguliere boorproces ontstaan in beginsel als er meer grond wordt weggenomen dan er materiaal wordt teruggebracht. Dit principe wordt volumeverlies genoemd. Volumeverlies wordt uitgedrukt als een percentage van het totaal ontgraven ('weggeboorde') volume in-situgrond. Hoewel dit een wat vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid is (er kan ook volumeverlies ontstaan door verdichting van de grond) is het in de praktijk een zeer bruikbare maat voor omgevingsbeïnvloeding door het boorproces.

In zachte grond zal het volumeverlies dat ontstaat rond de tunnelboormachine (TBM) zich vertalen in het zakken van de grond richting de TBM en de tunnel. Dit patroon breidt zich naar boven uit en verspreidt zich naar weerszijden van de tunnel. De exacte vorm van dit invloedsgebied is onder andere afhankelijk van de grondopbouw en diepte waarop geboord wordt. De zakking zal direct boven de tunnel het grootst zijn en richting de grenzen van het invloedsgebied steeds verder afnemen. Constructies die zich geheel of gedeeltelijk binnen het invloedsgebied bevinden, kunnen als gevolg van de zakkingen verplaatsen of vervormen. Vooral als er sprake is van relatief grote verschillen in zakkingen van een constructie kan er schade ontstaan. Met een zakkingsrisicoanalyse wordt vooraf een inschatting gemaakt van de kans op schade en eventuele grootte daarvan.

Calamiteiten
Naast het reguliere zakkingsrisico, waarvan de gevolgen beperkt blijven tot esthetische schade, bestaat er een gering risico dat er door een calamiteit een grote lokale verzakking ontstaat. Een dergelijke verzakking kan, afhankelijk van de grootte en locatie, ernstige (constructieve) schade veroorzaken aan constructies. Ook is het mogelijk dat er een (lokale) kuil ontstaat op maaiveld, waardoor bijvoorbeeld een weg ernstig beschadigd raakt. In beide gevallen is er sprake van een veiligheidsrisico voor de omgeving.

Een ernstige verzakking ontstaat als er – door een fout, technisch mankement of onregelmatigheid in de ondergrond – plotseling een grote hoeveelheid grond in de boormachine verdwijnt. Daarbij moet gedacht worden aan meerdere kubieke meters. Het gevolg is een lokale verzakking van circa 5 centimeter tot meters diep. Dit fenomeen laat zich niet meer uitdrukken in termen van volumeverlies.

In het vervolg van deze tekst wordt altijd uitgegaan van een regulier boorproces, tenzij expliciet aan het calamiteitenscenario wordt gerefereerd.

3.2.2 Ontwerpkeuzes en -middelen

Het ontwerp van een boortunnel is, zoals zo vaak, een iteratief proces. Daarbij spelen predicties een belangrijke rol: in eerste instantie bij het waarderen en vergelijken van ontwerpvarianten en later, na het vaststellen van het ontwerp, bij het formuleren van toetsingscriteria voor de borging van de uitvoeringskwaliteit. In deze paragraaf wordt vooral gekeken naar het eerste deel: ontwerpkeuzes.

De ontwerpvrijheden bij een boortunnel in stedelijk gebied zijn over het algemeen beperkt. De diameter is een directe afgeleide van de functie van de tunnel en volgt uit het gespecificeerde profiel van vrije ruimte (PVR), de noodzakelijke bouwtoleranties en de dikte van de tunnelwand. Dan blijven in relatie tot omgevingsbeïnvloeding het horizontaal en verticaal alignement over als ontwerpparameters, inclusief de locatie van de op dat alignement liggende start- en ontvangstschachten. Ook deze 'vrijheden' worden in hoge mate beperkt door:

- de keuze van het globale alignement, die volgt uit de verbinding die de tunnel moet vormen en dus uit de ligging van bijvoorbeeld stations en toeritten;
- begrenzingen van boogstralen (zowel horizontaal als verticaal) die volgen uit de functie van de tunnel;
- de wens om zo min mogelijk onder private eigendommen te bouwen, omdat daarvoor een overeenkomst met de eigenaar, het aankopen van percelen en gebouwen of in ultimo onteigening noodzakelijk is;
- dwangpunten op het alignement, met name diep gefundeerde objecten, zoals de funderingen van bruggen en kades.

Bovenop de beperkingen in deze opsomming komen de eisen met betrekking tot omgevingsbeïnvloeding. Daarvoor moet de kwaliteit van het boorproces worden 'geprojecteerd' op de omgeving. Of belendende constructies schade ondervinden, hangt af van een aantal factoren:

- Grootte van de zakkingen (volumeverlies).
- Vorm van het invloedsgebied.
- Positie van de constructie, met name de fundering, ten opzichte van de tunnel (en het invloedsgebied).
- Aard en toestand (staat van onderhoud) van de constructie.

Een schadepredictie die gebruikt wordt voor het ontwerp zal rekening moeten houden met de bovenstaande factoren. Om te beginnen wordt een redelijkerwijs te verwachten kwaliteit van het boorproces aangenomen, wat wordt uitgedrukt in volumeverlies. Vervolgens wordt het invloedsgebied bepaald op basis van de ligging van de tunnel, waarbij de mate van spreiding van de omgevingsbeïnvloeding vooral wordt bepaald door de grondslag en het volumeverlies. De locatie (diepte) en staat van de fundering van belendende constructies zijn tot slot van invloed op de deformatie en de daaruit voortkomende schade aan die constructie. Voor een inschatting van het schaderisico wordt gebruikgemaakt van de schadeklassen zoals beschreven en aanbevolen in [3].

In de praktijk resulteert de hierboven geschetste opgave (sterk vereenvoudigd) in de volgende achtereenvolgende ontwerpstappen om het risico op schade door omgevingsbeïnvloeding te beperken:

1. Positioneer de boortunnel zodanig dat zo min mogelijk belendingen in het invloedsgebied vallen. Dat geldt met name voor de delen van funderingen waaraan het draagvermogen wordt ontleend (paalpunten). Dit kan bijvoorbeeld betekenen dat het gunstiger is om ondiep door een straat te boren, zodat de invloed zich niet uitstrekt tot onder de funderingen. Dit resulteert in een smallere en diepere zakkingskromme op maaiveld, maar dat is meestal niet maatgevend.
2. Als het eerste niet mogelijk is, dan wordt de situatie over het algemeen gunstiger door juist dieper te boren, waardoor de resulterende zakkingen meer gespreid worden en de invloed op belendingen gelijkmatiger is (wat neerkomt op een brede en ondiepe zakkingskromme).
3. Indien het onvermijdelijk is dat een constructie sterk beïnvloed wordt, dan kan het schaderisico beperkt worden door het verbeteren van het incasseringsvermogen van de constructie. Bij de Noord/Zuidlijn is om die reden voorafgaand aan het boren op grote schaal funderingsherstel uitgevoerd.
4. Als na alle bovenstaande stappen op specifieke locaties nog steeds een significant zakkingsrisico aanwezig is, dan kunnen mitigerende maatregelen worden genomen. Bij de Noord/Zuidlijn is daarom besloten om op zeven locaties compensation grouting toe te passen voor kritische passages van monumentale en/of kwetsbare gebouwen.

Deze stappen beperken zich tot het ontwerp; voor de uitvoering geldt dat er zo goed mogelijk moet worden geboord. Daarbij speelt de omgevingsmonitoring een belangrijke rol.

Tot slot nog een opmerking over de voorgeschiedenis van de boortunnel van de Noord/Zuidlijn. Bij de voorbereiding, circa twintig jaar geleden, was er veel minder kennis en ervaring beschikbaar dan nu. Daarom is destijds veel aandacht besteed aan het modelleren van de invloed van het boorproces op de ondergrond, de interactie met paalfunderingen en de gevolgen voor de constructie van een gebouw. Met praktijkproeven werden deze fenomenen, onder andere bij de Tweede Heinenoordtunnel, nader onderzocht en de modellen gevalideerd. Op basis hiervan werd een alignement ontworpen voor de boortunnel. De invloed op elk gebouw werd individueel getoetst. Dit heeft geleid tot het genoemde funderingsherstel, de mitigerende maatregelen, eisen aan het boorproces en de inrichting van het monitoringssysteem.

3.2.3 Predicties en zakkingsprestatie-eisen

Na het definitief vaststellen van de voor de omgevingsbeïnvloeding relevante ontwerpaspecten moet een definitieve risicoanalyse voor het boorproces worden uitgevoerd. Uit deze risicoanalyse volgen de zakkingsprestatie-eisen voor het boorproces die worden vertaald in concrete (toetsbare!) criteria. Het formuleren van zakkingsprestatie-eisen kan vanuit twee richtingen worden benaderd: vanuit het incasseringsvermogen van de omgeving of vanuit de beoogde (en realistisch geachte) prestaties van het boorproces. Beide benaderingswijzen worden hieronder uitgewerkt, maar om te beginnen wordt nog even stilgestaan bij het begrip 'volumeverlies'.

Volumeverlies als indicator en prestatie-eis

Bij het formuleren van zakkingsprestatie-eisen speelt het begrip volumeverlies (volume loss) een centrale rol. Zoals reeds is aangegeven in PARAGRAAF 3.2.1 wordt volumeverlies gedefinieerd als het 'teveel' ontgraven volume als percentage van het totaal ontgraven volume. De grootheid volumeverlies is daarmee de afwijking ten opzichte van de theoretische ideale situatie waarbij een tunnel de oorspronkelijke in-situgrond exact een-op-een vervangt. Deze grootheid is gemakkelijk te begrijpen, heeft een praktische betekenis en maakt met een enkel getal de koppeling tussen boorprestatie en zakkingen. Daarmee vormt het volumeverlies ook een goede basis voor het afleiden van prestatie-eisen. Als aangenomen wordt dat er onder invloed van zakkingen geen volumeverandering van de grond zelf optreedt, dan is het opgetreden volumeverlies te bepalen door de zakkingen over een volledige dwarsraai te meten en de oppervlakte daarvan te delen door het ontgraven oppervlak van de tunnel.

Benaderingswijze 1: Maximale zakkingen afgeleid van de belendingen

Bij deze benadering wordt per object, en voor het maaiveld boven de tunnel, bepaald wat de maximale zakkingen zijn die nog tot een acceptabel schaderisico leiden. Per object wordt een schadepredictie opgesteld waarbij een relatie wordt gelegd tussen een schadebeeld en de vervormingen van de constructie (door zakkingsverschillen), tussen vervormingen en zakkingen, en tussen zakkingen en volumeverlies. Hierbij spelen voor belendingen factoren zoals bouwkundige staat, constructie, type en diepte van de fundering, en positie ten opzichte van de tunnel een rol. Met een parametervariatie wordt het volumeverlies bepaald bij een nog net acceptabel schaderisico.

Als het incasseringsvermogen van de belendingen (meestal gebouwen) als basis wordt gebruikt voor het afleiden van zakkingsprestatie-eisen, dan worden de volgende stappen doorlopen:

1. Belendingenonderzoek, resulterend in een schaderisicoclassificatie.
2. Modellering van de beïnvloeding per object (op basis van het bij het boren te verwachten zakkingspatroon).
3. Bepaling maximaal acceptabel volumeverlies per object door middel van parametervariatie.
4. Formulering van zakkingscriteria per object.

Met name voor stappen 2 en 3 wordt gebruikgemaakt van predictiemodellen die rekening houden met de eerdergenoemde invloedsfactoren.

Benaderingswijze 2: Maximale zakkingen op basis van boorprestaties

Bij deze benadering wordt een realistisch geachte boorprestatie uitgedrukt in volumeverlies, en geprojecteerd op alle objecten in het invloedsgebied. Daarnaast wordt hetzelfde gedaan voor de slechtste boorprestatie waarmee rekening wordt gehouden. Het resultaat is, naast concrete zakkingscriteria, een analyse van het schaderisico, met name de marge die bestaat bij een goed verlopend boorproces. Mocht die marge er niet zijn, dan kan dat aanleiding zijn voor mitigerende maatregelen.

De zakkingsrisicoanalyse bestaat uit de volgende stappen:
1. Het vaststellen van een realistische boorprestatie (target) en de slechtste boorprestatie waarmee rekening wordt gehouden (grenswaarde), beide in termen van volumeverlies.
2. Bepaling van het invloedsgebied langs het boortracé (op basis van de grenswaarde voor het volumeverlies).
3. Belendingenonderzoek.
4. Schadepredicties per object.
5. Formulering van zakkingscriteria per object.

Een voordeel van deze benaderingswijze is een relatief gelijkmatige en consistente set prestatie-eisen langs het hele boortracé. Bovendien past het bij de manier waarop in de praktijk een beheerst boorproces wordt nagestreefd, namelijk door het zoeken naar optimale instellingen die zo min mogelijk worden gevarieerd.

Zakkingsprestatie-eisen
Ongeacht de stappen waarmee de zakkingsprestatie-eisen worden afgeleid, bestaat de laatste stap uit het vertalen van een volumeverlies in concrete, meetbare prestatie-eisen. Dat gebeurt in de vorm van grenswaarden voor de verplaatsingen van individuele meetpunten. Die meetpunten kunnen zich overal binnen het invloedsgebied bevinden, zowel op constructies als op het maaiveld boven de tunnel. De maximaal toegestane verplaatsing is afhankelijk van de locatie van het meetpunt en de vorm van de lokale zakkingskromme.

Er zijn goede ervaringen opgedaan met het zogeheten stoplichtsysteem, waarbij voor de te meten verplaatsingen een aantal zones zijn gedefinieerd met kleuren en een classificatie van de (boor)prestatie in relatie tot de toegestane verplaatsingen. Bij de Noord/Zuidlijn is bijvoorbeeld toegepast:
- Groen: zeer goed (0-30% grenswaarde).
- Geel: goed, maar kan beter (30-60% grenswaarde).
- Oranje: verbetering zeer wenselijk (60-100% grenswaarde).
- Rood: niet acceptabel (> 100% grenswaarde).
- Paars: waarschuwingszone voor zeer grote zakkingen (typisch > 150% grenswaarde).

De exacte verdeling van de zones en de daaraan gekoppelde signaalwaarden wordt hier als voorbeeld genoemd en is tijdens de uitvoering ontwikkeld. Dit systeem leent zich goed voor visualisatie in een (online) geografisch informatiesysteem (GIS) en voor het maken van afspraken tussen betrokkenen.

Ervaringen en aanbevelingen
Bij de schaderisicoanalyse (*settlement risk assessment*) voor de Noord/Zuidlijn is gekozen voor de eerste benadering, namelijk het hanteren van belendingen als uitgangspunt. Per object is een schaderisicoanalyse opgesteld, resulterend in een maximaal acceptabel volumeverlies. Op basis van dat volumeverlies zijn zowel de maximale zakkingen per meetpunt op de panden, als de maximale zakkingen op maaiveld boven de tunnel afgeleid. Deze aanpak resulteert in 'maatwerk' zakkingsprestatie-eisen per pand die langs het tracé behoorlijk kunnen variëren (bij wijze van spreken elke 10 meter), met verschillen die vooral te herleiden zijn aan funderingsdiepte en gebouwklasse. In de praktijk blijken de strengste eisen maatgevend; het is niet realistisch om de boorinstellingen continu te variëren. Bovendien wordt in de praktijk de best haalbare boorprestatie nagestreefd. Daarbij speelt het leerproces binnen het project een belangrijke rol: eenmaal succesvol gebleken instellingen en instructies worden vastgehouden ('gaat goed zo, niets meer aan doen'). Uiteraard zijn boorinstellingen en instructies wel afhankelijk van de positie van de TBM op het tracé (onder andere vanwege diepteligging en grondslag), maar het lokaal bijregelen vanwege zakkingsprestaties is niet aan de orde.

Uit het voorgaande volgt de aanbeveling om de zakkingsprestatie-eisen te baseren op hetgeen redelijkerwijs mogelijk is qua boorproces. In de praktijk zal dat gebeuren met een targetwaarde voor het volumeverlies waar de zakkingseisen vervolgens van worden afgeleid.

3.2.4 Monitoringsfilosofie

Tot nu toe is in deze paragraaf ingegaan op het afleiden van zakkingsprestatie-eisen en het vertalen van die eisen naar maximaal toegestane verplaatsingen op specifieke locaties (meetpunten). Daarmee ontstaat de behoefte die punten te monitoren. In deze paragraaf wordt die behoefte gekoppeld aan praktische doelstellingen en worden de functionele eisen aan het monitoringssysteem afgeleid.

Doel monitoring

Het doel van de omgevingsmonitoring is drieledig:

1. Toetsing: het toetsen van de daadwerkelijk optredende zakkingen aan de zakkingsprestatie-eisen.
2. Bewaking: het bewaken van de invloed van het boorproces op gebouwen om het risico op schade te beheersen.
3. Feedback: de terugkoppeling van de boorprestaties met betrekking tot omgevingsbeïnvloeding om daarmee het boorproces te kunnen bijregelen.

Hieronder wordt nader ingegaan op deze drie doelen. Naast deze doelen met een nadrukkelijk technisch en/of contractueel karakter geeft een grondig opgezet monitoringsprogramma de omgeving het vertrouwen dat het boorproces goed wordt bewaakt. Daarnaast helpt een objectieve vaststelling van de daadwerkelijk opgetreden zakkingen bij het afhandelen van schadeclaims, wat zowel voor het project als voor de omgeving prettig is.

Toetsing aan de zakkingsprestatie-eisen

Dit doel van de monitoring volgt rechtstreeks uit de wens om de eisen aan het boorproces te kunnen verifiëren. In de praktijk zal getoetst worden op het overschrijden van vooraf vastgestelde grenswaarden. Contractueel kunnen daar consequenties aan verbonden worden, zoals het constateren dat sprake is van een tekortkoming bij (structurele) overschrijding van grenswaarden met de verplichting om maatregelen te nemen. Ook kunnen boetes en/of bonussen worden verbonden aan de te toetsen boorprestaties. Technisch-inhoudelijk is de toetsing van de zakkingen interessant om predicties te evalueren.

Bewaking van de uitvoering (risicobeheersing)

Het tweede doel van de monitoring heeft betrekking op de operationele risicobeheersing tijdens het boren. Met de informatie uit het monitoringssysteem kan in een relatief vroeg stadium (te) grote invloed op de omgeving worden waargenomen. De monitoringsresultaten zelf kunnen daarbij als indicator dienen (bij overschrijding van grenswaarden), maar de metingen kunnen ook gebruikt worden om (alarm)signalen uit andere bronnen te verifiëren. In de praktijk blijkt het bijzonder effectief om de risico's met betrekking tot omgevingsbeïnvloeding te beheersen door het in onderlinge samenhang bewaken van de volgende indicatoren:

1. Omgevingsmonitoring: alarmering bij het overschrijden van vooraf bepaalde signaalwaarden.
2. Waarneming op maaiveld: meldingen van schade of bijzonderheden vanuit de omgeving.
3. Boorproces: alarmering op basis van digitale (online) boorprocesinformatie of door meldingen van de boorploeg of waarnemers van de opdrachtgever op de TBM.

Bij de bewaking van het boorproces met deze indicatoren geldt een driehoeksprincipe: als informatie uit één van deze bronnen duidt op (mogelijke) afwijkingen van het proces, dan leidt dat minstens tot een verhoogde waakzaamheid en het extra controleren van de overige twee indicatoren. Bij een plotselinge overschrijding van een signaalwaarde voor de

zakkingen zal bijvoorbeeld worden nagegaan of zich bijzonderheden hebben voorgedaan bij het boren (de oorzaak) en wordt een extra inspectieronde op maaiveld gedaan. Is er sprake van een schademelding (afkomstig van maaiveld), dan zullen de monitoringsresultaten van de desbetreffende locatie extra worden gecontroleerd en volgt een toets op bijzonderheden bij het boorproces. Tot slot kan een waargenomen onregelmatigheid in het boorproces aanleiding zijn voor een extra controle van de monitoringsresultaten en zelfs een aanvullende inspectieronde 'boven'.

Feedback boorproces
Het derde doel van de monitoring is het verschaffen van informatie voor het optimaliseren van het boorproces. Hierbij wordt feitelijk een procesregeling met terugkoppeling gerealiseerd, waarbij informatie over de zakkingsprestaties worden gecorreleerd aan instellingen van het boorproces. Met name het verband tussen maaiveldzakkingen en de instellingen van de staartspleetinjectie is effectief gebleken bij het minimaliseren van de omgevingsbeïnvloeding.

Het is de vraag of het opzetten van een monitoringsprogramma met de hierboven genoemde doelen als een toepassing van de observational method (zie [2]) kan worden beschouwd. Er is weliswaar sprake van een grote hoeveelheid metingen tijdens de uitvoering die inzicht moeten geven in de interactie van het bouwproces met de omgeving, maar van ontwerpscenario's en schakelmomenten is geen sprake. Het uitgangspunt is dat beheersing van de zakkingen mogelijk is binnen het normale bereik van de instellingen van het boorproces.

Omvang monitoring
Om aan alle doelstellingen van de omgevingsmonitoring te voldoen, is een systeem nodig dat een actueel inzicht geeft in de opgetreden verplaatsingen en verzakkingen in het invloedsgebied van de TBM. Dit resulteert in de omvang van het gemonitorde gebied, het type metingen en de frequentie en snelheid van beschikbaarheid van de meetgegevens.

Type metingen
Als uitgangspunt geldt een monitoringssysteem bestaande uit *robotic total stations* (RTS'en) waarmee volledig automatisch en relatief hoogfrequent zowel meetpunten in de vorm van prisma's als reflectorloze metingen op verharde oppervlakken kunnen worden ingemeten (virtuele meetpunten). Met een dergelijk systeem zijn bij de Noord/Zuidlijn, en daarvoor al bij de Hubertustunnel, zeer goede ervaringen opgedaan. In de praktijk worden die metingen overigens aangevuld met handmatige metingen (zowel als terugvalmogelijkheid bij storingen als ter controle). Voor de praktische omgevingsmonitoring blijkt ondergrondse monitoring met bijvoorbeeld inclino- of extensometers niet geschikt en evenmin noodzakelijk. Bij beide genoemde projecten hebben dergelijke metingen niet tot bruikbare resultaten geleid. Zie ook de conclusie van HOOFDSTUK 4 over de bouwputten van de Noord/Zuidlijn.

Te monitoren gebied en objecten
Het te monitoren gebied is in beginsel het invloedsgebied van de boortunnel. Daarbuiten meten heeft (technisch) geen zin. In de praktijk wordt overigens met een bepaalde marge gewerkt om zeker te zijn dat de monitoring het invloedsgebied meer dan overlapt. Voor zowel de toetsing als de bewaking worden alle objecten waarvoor zakkingsprestatie-eisen zijn geformuleerd van meetpunten voorzien. In beginsel zijn dat alle objecten binnen het invloedsgebied waarvoor een zeker schaderisico geldt, zoals gebouwen en kademuren, maar ook het maaiveld bij tramsporen of boven kwetsbare leidingen. Het aantal meetpunten en de positionering van die meetpunten moet zodanig zijn dat daarmee een representatief beeld ontstaat van de eventuele beïnvloeding van een object.

Figuur 3.1 / Prisma's (links) en robotic total stations. (Bron: Dienst Noord/Zuidlijn)

Voor bewakings- en feedbackdoeleinden worden maaiveldmetingen gebruikt. Dat zijn metingen boven de as van een tunnelbuis en op dwarsraaien haaks op de tunnel-as over de volledige breedte van het invloedsgebied. In stedelijk gebied zijn dit over het algemeen reflectorloze metingen op de bestrating met onderlinge tussenafstanden van 1 of 2 meter. De metingen op de tunnel-as geven de meest directe feedback over de mate van omgevingsbeïnvloeding door het boren (de zakkingen zijn daar immers het grootst). Bovendien is dit type meting zeer geschikt voor het waarnemen van zakkingen in relatie tot de positie van de TBM, het identificeren van trendmatige ontwikkelingen en voor de correlatie van zakkingen met boorprocesinstellingen. Verder zijn maaiveldmetingen op de tunnel-as goede '*early warning*'-indicatoren ter bewaking van het boorproces, omdat daarmee afwijkingen gedetecteerd kunnen worden vóórdat die tot schade leiden. In de schaderisicoanalyse voor belendingen kan een relatie worden gelegd tussen de grenswaarden voor gebouwen en de bijbehorende zakkingen op de as van de tunnel. Hierdoor worden de zakkingscriteria als het ware verlegd naar de maaiveldmetingen. In de praktijk is het boorproces te beheersen door het bewaken van de maaiveldzakkingen op basis van deze criteria en het eerdergenoemde stoplichtsysteem. Als zakkingscriteria op basis van een maximaal toegestaan volumeverlies worden gehanteerd, dan is sprake van een vergelijkbare aanpak, waarbij de as-metingen niet alleen voor bewaking en feedback worden gebruikt, maar ook onderdeel zijn van de toetsingen.

Met het meten van dwarsraaien kan de daadwerkelijke breedte van het invloedsgebied worden bepaald. Dit is waardevolle informatie voor de bewaking van het boorproces, maar is ook interessant voor de toetsing van de predictiemodellen. Door de algemeen voor zakkingen bij tunnels gehanteerde gausscurve te fitten op de dwarsraaimetingen kan ook de spreiding van de zakkingen (k-factor) en het volumeverlies worden bepaald.

Snelheid en beschikbaarheid
Voor de bewaking van de omgevingsbeïnvloeding zijn realtimemetingen vereist, evenals voor de feedback van zakkingsgegevens naar het boorproces. In de praktijk blijkt een gemiddeld meetinterval van één uur zowel haalbaar als effectief. Dit biedt een voldoende snelle informatievoorziening ter bewaking van eventuele onverwachte zakkingen en is qua meetfrequentie passend bij de naar verhouding snelle passage van de TBM (een voortgang van meer dan 2 meter per uur is mogelijk). Voor het contractueel toetsen van de zakkingsprestaties is strikt genomen geen hoogfrequent meetsysteem noodzakelijk. Het vooraf en achteraf inmeten van de meetpunten waarvoor zakkingseisen zijn geformuleerd, is theoretisch voldoende. De hoogfrequente metingen zorgen echter voor extra kwaliteit (met name door redundantie) en maakt het vrij eenvoudig om de toetsing te automatiseren.

Monitoring in relatie tot het boorproces
Bij een boortunnel in stedelijk gebied is de monitoring een onlosmakelijk onderdeel van het uitvoeren van een beheerst boorproces met betrekking tot de omgevingsbeïnvloeding. Dit kwam in de vorige paragraaf al aan de orde bij het doel van de monitoring. In deze paragraaf wordt de relatie monitoring-boorproces nog iets verder uitgewerkt.

De omgevingsmonitoring geeft de mogelijkheid om de zakkingsprestaties terug te koppelen naar het boorproces en zo een gesloten regelkring te creëren. De wens om dat te kunnen doen, stamt al uit de begintijd van de tunnelboortechniek in Nederland, onder andere door de implementatie van een zogeheten integraal boorbeheerssysteem (IBBS) [4]. Met een feedbackregeling kan een prestatie zeer effectief worden geoptimaliseerd zonder dat volledige kennis van het te regelen systeem vereist is. De aanpak vereist echter wel voldoende informatie over het proces (waarneembaarheid) en de mogelijkheid daadwerkelijk invloed te hebben op dat proces (regelbaarheid). Met andere woorden: voldoende metingen van zowel zakkingen als boorproces, en de beschikbaarheid van de juiste knoppen om aan te draaien.

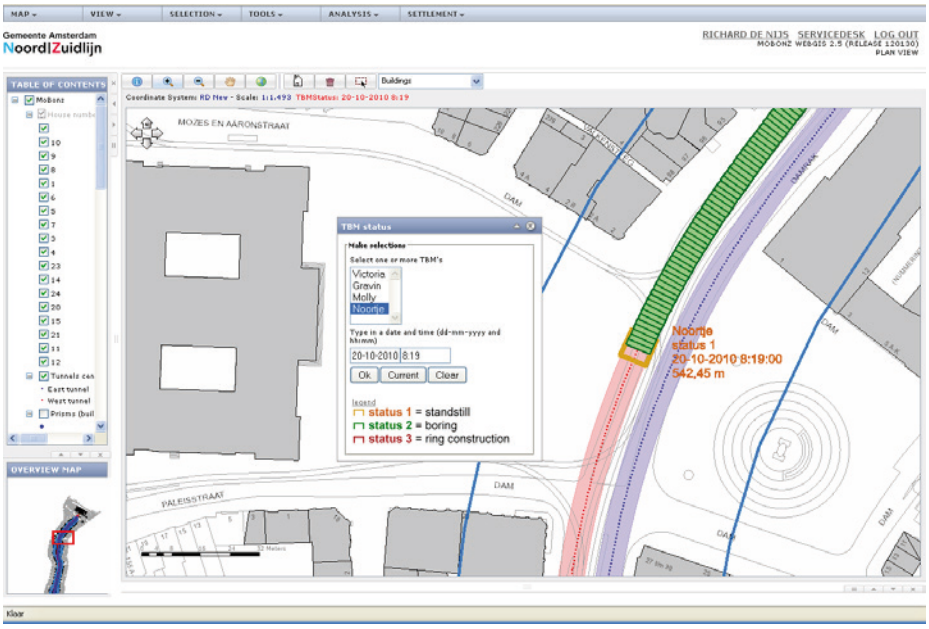
In de praktijk gaat het bij de terugkoppeling van zakkingsprestaties om twee dingen: 1) het correleren van typische boorparameters aan zakkingen om het proces te kunnen bijregelen, en 2) de bewustwording dat omgevingsbeïnvloeding een primaire prestatie-indicator is voor het boorproces. Het eerste resulteert in boorinstructies die moeten leiden tot minimale zakkingen en is typisch de taak van de projectleider voor de uitvoering van het boorproces (de verkeerstoren in de keet 'boven'). Het tweede moet resulteren in een constante alertheid bij de uitvoerders van het boorproces en het besef dat de besturing van de boormachine direct invloed heeft op de zakkingsprestaties. Dat laatste is de verantwoordelijkheid van de leider van een boorploeg (vaak de ploegingenieur genoemd) en zijn team.

Waarnemen en bijregelen (feedback)
Zowel het data-acquisitiesysteem van de tunnelboormachine als het monitoringssysteem produceert grote hoeveelheden (digitale) data. Die datastromen moeten samenkomen om een feedbackregeling te realiseren. Dit klinkt abstract, maar in de praktijk komt het neer op het op een identieke schaalverdeling genereren van grafieken van zowel zakkingen als boorparameters (zoals groutvolumes en -drukken). Vervolgens komt er de nodige engineering judgement aan te pas om de trendmatige verbanden tussen de zakkingen en de boorprocesinstellingen te herkennen. Het zo verkregen inzicht wordt verwerkt in de – door de projectleider boorproces – op te stellen instructies. Een geautomatiseerde aanpak, zoals bijvoorbeeld in een doorontwikkeld IBBS werd voorzien [4], is in de praktijk van onder andere de Noord/Zuidlijn niet toegepast. Het proces is te complex om te automatiseren en *engineering judgement* is juist heel effectief gebleken.

Een belangrijke succesfactor voor de hierboven geschetste aanpak was het vlot en betrouwbaar verwerken van de monitoringsdata in aan boorparameters te correleren zakkingswaarden. Daarvoor werden per individueel meetpunt de zakkingen gerelateerd aan de positie van de TBM. Vervolgens konden op uniforme wijze de zakkingswaarden tijdens en na de TBM-passage worden bepaald. Die waarden, gekoppeld aan specifieke locaties op het tracé, lieten zich vervolgens correleren aan eveneens op het tracé betrokken boorparameters.

Bewustzijn en bewaking
De bewaking van de zakkingsprestaties gebeurt in de praktijk op basis van het eerdergenoemde stoplichtsysteem (zie PARAGRAAF 3.2.3). Door het op de boormachine zichtbaar maken van een (GIS-)kaartbeeld van de TBM in haar omgeving, waarbij alle meetpunten met hun kleuren inzicht geven in de boorprestatie, wordt deze prestatie-eis heel concreet teruggekoppeld naar de uitvoering. Dit is psychologisch waardevol, want het zorgt voor omgevingsbewustzijn in de van nature gesloten werkomgeving op de TBM. Daarnaast biedt het ook de mogelijkheid om snel te reageren op (dreigende) overschrijdingen van de

prestatie-eisen. In de praktijk staat het kaartbeeld permanent ingeschakeld op een van de beeldschermen van de stuurcabine en op de computer van de ploegingenieur. Het systeem voorziet bovendien in alarmmeldingen. Hetzelfde kaartbeeld wordt ook 'boven' gebruikt door de projectleider boorproces en de uitvoeringsbegeleiding van de opdrachtgever.



Figuur 3.2 / Screenshot van de gebruikersinterfase tijdens het boorproces van de Noord/Zuidlijn. Hier is de tunnelboormachine onder de Dam. (Bron: Witteveen+Bos)

Uitvoerende partij voor de monitoring

Onafhankelijk van de technische opgave zal er bij het inrichten van een monitoringsprogramma voor een boortunnel de keuze moeten worden gemaakt wie daarvoor de uitvoerende partij moet zijn. Bij de Noord/Zuidlijn is ervoor gekozen om de monitoring separaat aan te besteden, terwijl de monitoring bij de Hubertustunnel de verantwoordelijkheid was van de hoofdaannemer van het project. In beide gevallen was de dataverwerking de verantwoordelijkheid van het door de opdrachtgever ingeschakelde ingenieursbureau. Bij beide projecten heeft de gekozen taakverdeling goed gewerkt.

Overwegingen voor het wel of niet separaat aanbesteden van de monitoring zijn:

- De omgeving ervaart het over het algemeen als logisch dat de opdrachtgever zelf de monitoring uitvoert en niet overlaat aan de aannemer.
- Er bestaat een nauwe samenhang tussen het opstellen van zakkingspredicties, de schaderisicoanalyse en het formuleren van zakkingsprestatie-eisen, en de monitoringsbehoefte die daaruit volgt; omdat het eerste meestal de verantwoordelijkheid van de opdrachtgever is, is het praktisch om ook de monitoring door de opdrachtgever te laten uitvoeren.
- Het mee-aanbesteden van de monitoring in het hoofdcontract voorkomt extra interfaces met een derde partij.
- Door de monitoring op te nemen in het hoofdcontract kan het een integraal onderdeel worden van de kwaliteitsborging van de hoofdaannemer.

De afweging is projectspecifiek; er is geen eenduidige aanbeveling te geven. Zodra echter belangrijke ontwerpkeuzes, met name het alignement en de diepteligging, door de opdrachtgever zijn gemaakt, dan is het logisch dat hij ook de schaderisicoanalyse en de aanpak van de monitoring ter hand neemt. Dit is in lijn met de aanbevelingen daarover in de CUR 223 *Richtlijn meten en monitoren van bouwputten* [1].

3.3 Techniek

Deze paragraaf gaat dieper in op de techniek van de monitoring, waaronder het meetsysteem en het monitoringplan (PARAGRAAF 3.3.1), het verwerken van de meetgegevens (PARAGRAAF 3.3.2) en het visualiseren van de verzamelde informatie (PARAGRAAF 3.3.3). Het monitoringssysteem wordt verder uitgewerkt, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen twee deelsystemen: het meetsysteem en het dataverwerkingssysteem.

3.3.1 Het meetsysteem en het monitoringplan

De vorige paragraaf ging in op het ontwerp van de boortunnel, de zakkingspredicties en de informatiebehoefte tijdens de uitvoering. Daarbij is al een beetje vooruitgelopen op het type metingen, omdat de vraag naar informatie niet los te zien is van de technische mogelijkheden. Zoals in PARAGRAAF 3.2.4 is aangegeven, zijn er goede ervaringen opgedaan met een systeem dat hoofdzakelijk bestaat uit robotic total stations die automatisch een grote hoeveelheid meetpunten inmeten. Zonder in te gaan op de zeer specialistische aspecten van de meettechniek wordt in deze paragraaf de opzet van een dergelijk meetsysteem beschreven.

Meetpunten

Bij een meetsysteem bestaande uit RTS'en worden drie soorten meetpunten onderscheiden:

1. Asmetingen: maaiveldmetingen van verticale verplaatsingen recht boven de tunnel-as van elke buis. De onderlinge afstand bedraagt maximaal 2 meter. De metingen worden in principe over het gehele tunneltracé uitgevoerd, tenzij dat niet mogelijk is of niet nodig wordt geacht. Dat laatste is alleen het geval als er in de betreffende zone geen kwetsbare objecten in het invloedsgebied liggen én er geen behoefte bestaat aan het 'inregelen' van het boorproces ten behoeve van het vervolg van het tracé. De metingen kunnen reflectorloos worden uitgevoerd, of in een niet-verharde omgeving door midden van zakbaken met prisma's (reflectors).
2. Dwarsraaien: maaiveldmetingen van verticale verplaatsingen in een lijn haaks op de tunnel-as die het volledige invloedsgebied overspant. De onderlinge afstand tussen de meetpunten bedraagt maximaal 2 meter om voldoende informatie te hebben voor de identificatie van de zakkingskromme. Een nuttige onderlinge afstand tussen de dwarsraaien is circa 100 meter, maar dat zal in de praktijk vooral worden bepaald door de beschikbare ruimte op maaiveld (desnoods worden halve dwarsraaien toegepast). De metingen kunnen reflectorloos worden uitgevoerd, of in een niet-verharde omgeving door middel van zakbaken met prisma's.
3. Gebouwen en overige constructies: metingen van de verplaatsingen in x-, y- en z-richting op objecten in het invloedsgebied en in een zone direct daarbuiten. De verdeling van de meetpunten op een object is afhankelijk van de aard van de constructie en de afmetingen. Bij een gebouw van beperkte afmetingen (bijvoorbeeld een woonhuis) is het uitgangspunt vier meetpunten per gevel die zo veel mogelijk op de uiterste hoeken van de constructie geplaatst worden. Bij grotere objecten worden meer meetpunten per gevel toegepast, waarbij de onderlinge afstand bij voorkeur niet groter is dan circa 6 meter, en waarbij rekening gehouden wordt met de te verwachten vervormingen in relatie tot de aard van de constructie (door de meetpunten te plaatsen op steunpunten in de constructie). In de praktijk zal het lang niet altijd lukken om alle gevels volledig van meetpunten te voorzien. Er zal dan gestreefd moeten worden naar een voldoende representatief beeld van de totale vervorming, en naar voldoende meetpunten zo dicht mogelijk bij de tunnel. Bij lage, langgerekte constructies zoals kademuren volstaat een enkele rij meetpunten waarbij de onderlinge afstand moet passen bij de aard (flexibiliteit) van de constructie.

Bij het ontwerp van een meetsysteem zal eerst de gewenste locatie van alle meetpunten worden bepaald en weergegeven in een tekening. In zo'n voorontwerptekening wordt een aanname gedaan met betrekking tot de meetpunten die redelijkerwijs te meten zouden

moeten zijn. Vervolgens zullen bij deze meetpunten de opstellocaties van de RTS'en moeten worden bepaald. Die zijn afhankelijk van onder andere de volgende factoren:

- Het aantal meetpunten dat een RTS per meetcyclus (van een uur) kan inmeten.
- De maximale afstand waarbinnen een RTS nog voldoende nauwkeurig en betrouwbaar kan inmeten (als ervaringsregel geldt daarvoor circa 75 meter).
- Het kunnen 'aanstralen' van alle meetpunten door een geschikt gepositioneerde RTS.
- De beschikbaarheid van opstelplaatsen voor RTS'en; bij voorkeur worden RTS'en opgehangen aan bestaande constructies, maar zo nodig dienen speciale opstelpunten gebouwd te worden (bijvoorbeeld op daarvoor opgestelde palen).
- De uitvoerbaarheid van referentiemetingen; ten behoeve van de kalibratie van de metingen dienen voldoende vaste punten buiten het invloedsgebied beschikbaar te zijn (daardoor is het geen bezwaar dat een RTS zelf wel in het invloedsgebied wordt aangebracht). Bij de Noord/Zuidlijn hing de meerderheid van de RTS'en in het invloedsgebied; vaak op de hoeken van de gevels direct langs de straat boven het tracé.

De verdere uitwerking tot een uitvoeringsontwerp is een specialistische opgave die de verantwoordelijkheid is van de opdrachtnemer voor de monitoring.

Duur en frequentie van de metingen

Kenmerkend voor het meten van de omgevingsbeïnvloeding als gevolg van een boortunnel is de relatief korte periode waarin die plaatsvindt (tijdens de procesmonitoring). De totale meetperiode laat zich onderverdelen in drie fasen:

1. Basismonitoring: de fase vanaf de start van de metingen tot het moment dat invloed door het boorproces te verwachten is. In deze fase wordt het meetsysteem getest (werking, nauwkeurigheid, betrouwbaarheid).
2. Procesmonitoring: de fase dat beïnvloeding door het boorproces te verwachten is. Bij een boortunnel is deze fase zeer kort, meestal minder dan een week!
3. Close-outmonitoring: de fase na de beïnvloeding door het boorproces, die voortduurt tot het moment dat elk effect als gevolg van boren is uitgewerkt. In deze fase kunnen de eindzakkingen worden bepaald.

De duur van de hierboven genoemde fasen verschilt per type metingen. De maaiveldmetingen, zowel op de tunnel-as als op de dwarsraaien, dienen primair om de boorprestatie te monitoren en richten zich daarom op de passage van de TBM. Ze worden ingericht per tunnelbuis. De basismonitoring dient slechts om de uitgangssituatie vast te stellen, de procesmonitoring volgt de ontwikkeling van de zakking tijdens de passage en de close-outmonitoring wordt gebruikt om een eindwaarde te bepalen. Voor de basismonitoring van een meetpunt kan zeven tot veertien dagen worden gehanteerd, de procesmonitoring duurt zolang de TBM zich in het invloedsgebied van het meetpunt bevindt en voor de close-outmonitoring kan circa twee weken worden gebruikt. Dit zijn ervaringswaarden van zowel de Noord/Zuidlijn als de Hubertustunnel. In de praktijk kan het handig zijn om de beschikbaarheid van basismonitoring en de procesmonitoring te koppelen aan de locatie van de TBM. De maaiveldmetingen moeten bijvoorbeeld minstens 150 meter voor de TBM starten en doorgaan tot circa 50 meter achter de TBM. Het venster van de procesmonitoring is geometrisch bepaald door de maximale grootte van het invloedsgebied.

Voor de monitoring van gebouwen en constructies gelden langere periodes voor zowel de basismonitoring als de close-outmonitoring (de procesmonitoring is afhankelijk van de voortgang van de TBM en duurt even lang als bij de maaiveldmetingen). Bovendien worden gebouwen en constructies over het algemeen niet per buis, maar gedurende de hele projectduur gemonitord. Hierdoor ontstaat een 'tussenfase' tussen de procesmonitoring voor de eerste TBM-passage en de procesmonitoring voor de tweede passage. De duur van die tussenfase volgt uiteraard uit de planning van de boorwerkzaamheden.

De close-outperiode (na de tweede TBM-passage) moet ten minste voortduren tot er geen effecten van het boorproces meer zijn waar te nemen. In de praktijk blijkt er, enigszins afhankelijk van grondslag en diepteligging, soms nog sprake van enige zakkingen nadat een meetpunt uit het invloedsgebied van de TBM is geraakt. Uit ervaring blijkt dat die nazakkingen gering zijn (maximaal circa 20 procent van de eindzakking) en dat ze zich in enkele weken volledig ontwikkelen. Het is echter aan te bevelen om de close-outmonitoring ten minste circa drie maanden te laten duren, omdat dat een tijdsduur is die ook voor de eigenaren van betreffende objecten logisch en acceptabel is. Voor de basismonitoring is het logisch om gedurende een vergelijkbare periode (van circa drie maanden) het systeem te leren kennen en inzicht te verkrijgen in de uitgangssituatie.

Zoals reeds eerder is aangegeven, dient de meetfrequentie tijdens de procesmonitoring voldoende hoog te zijn om het boorproces te kunnen volgen en om over enige reserve in de metingen te beschikken. In de praktijk heeft een meetinterval van een uur zich wat dat betreft positief bewezen.

Vanwege de relatief korte duur van de basis- en close-outmonitoring wordt voor de maaiveldmetingen maar één meetinterval gehanteerd. Voor meerdere maanden durende basismonitoring, tussenfasemonitoring en de close-outmonitoring van gebouwen en constructies kan een lagere meetfrequentie met intervallen van vier of zes uur tussen de metingen worden gebruikt.

Aanvullende handmatige metingen (meetbouten)
Naast het volledig automatische monitoringssysteem is het zeer wenselijk om een aanvullende meetmogelijkheid te realiseren in de vorm van een meetnet met meetbouten voor nauwkeurigheidswaterpassingen. Deze handmatig in te meten meetpunten dienen als controle van het automatische systeem en als terugvaloptie mocht het automatische systeem uitvallen. Bovendien kunnen de meetbouten achterblijven als het automatische meetsysteem wordt ontmanteld, wat de omgeving de zekerheid geeft dat er altijd een mogelijkheid blijft voor controlemetingen.

De meetbouten worden aangebracht op alle constructies en gebouwen die ook door het automatische meetsysteem gemonitord worden. De locaties van de meetbouten worden gekozen op een vergelijkbare wijze als de vaste meetpunten. De meetbouten worden vanaf het begin van de basismonitoring tot het einde van de close-outmonitoring elke vier weken ingemeten (uiteraard met de mogelijkheid van extra metingen als daar aanleiding toe is).

Ideale situatie versus werkelijkheid
De hierboven geschetste inzet van het automatische meetsysteem biedt, tenminste in theorie, een optimale praktische waarneembaarheid van het boorproces qua omgevingsbeïnvloeding. Afgezien van de kosten, kent deze aanpak de volgende praktische beperkingen:

- De uitvoerbaarheid van de maaiveldmetingen is sterk afhankelijk van de bereikbaarheid van dat maaiveld: zolang de tunnel het stratenpatroon volgt zijn de (reflectorloze!) metingen op de tunnel-as goed uitvoerbaar (zoals bij de Noord/Zuidlijn).
- Het zal in de praktijk lang niet altijd mogelijk zijn om op alle gevels van gebouwen het gewenste aantal meetpunten aan te brengen; ook hierbij geldt dat dit voor de voorgevels vaak goed te doen is, als het stratenpatroon wordt gevolgd.
- Voor alle automatische metingen geldt dat de zichtlijnen tussen RTS en meetpunten van invloed zijn op de uitvoerbaarheid van de metingen; hiermee moet al bij het ontwerp rekening worden gehouden, maar tijdens de uitvoering zal het dikwijls voor-

komen dat meetpunten (tijdelijk) geblokkeerd worden door bijvoorbeeld passerend verkeer, geparkeerde auto's, bomen en planten, steigers, etc.

Deze praktische beperkingen kunnen succesvol gecompenseerd worden door voldoende redundantie in de metingen. Dat heeft zowel betrekking op de dichtheid van het meetnet (met name de maaiveldmetingen met maximaal 2 meter tussenafstand) als de relatief hoge meetfrequentie bij meetintervallen van een uur.

3.3.2 Verwerking van de metingen

Het dataverwerkingssysteem ontvangt alle gegevens uit het meetsysteem, slaat die op en voert er bewerkingen op uit. Verder wordt informatie via internet ontsloten voor gebruikers, onder andere door visualisatie van de gegevens. De kern van het dataverwerkingssysteem is een database waarin alle voor het monitoringssysteem relevante gegevens worden opgeslagen. Op die gegevens kunnen bewerkingen worden uitgevoerd (waarvan de resultaten ook weer worden opgeslagen) en de database kan gebruikt worden voor diverse soorten (uitvoer)doeleinden. De database bevat onder andere:

- Gegevens per meetobject (gebouw of andere constructie), zoals de locatie, het adres, eigenschappen van de constructie, etc.
- Gegevens per meetpunt, zoals de locatie, het type meetpunt, de actuele status, eventuele referentie- en rekenwaarden, etc.
- Meetreeksen per meetpunt: de daadwerkelijke metingen bestaande uit het (exacte!) meettijdstip, gemeten grootheden, eventuele afgeleide waarden, etc.
- Gegevens over de RTS'en.
- Positiegegevens van de TBM: met regelmatige intervallen (in principe elke vijf minuten) geregistreerde positie van de TBM, de status, etc. Deze gegevens worden gebruikt om de monitoringsdata te relateren aan het boorproces.

Deze gegevens hebben verschillende bronnen en volgen uit verschillende fasen van het monitoringsprogramma, zoals:

- Gegevens uit het monitoringplan (ontwerp).
- As-builtgegevens.
- Metingen (afkomstig uit het meetsysteem).
- Resultaten van bewerkingen door het systeem.
- Door gebruikers gewijzigde of aangevulde gegevens.

Een deel van de data wordt continu geactualiseerd en zo nodig bewerkt. De database is ondergebracht op een centrale via internet toegankelijke (maar beveiligde!) server.

Snelheid beschikbaarheid metingen

Met name voor de bewakingsfunctie van het monitoringssysteem is het belangrijk dat metingen zo snel mogelijk in de centrale database geplaatst worden. Uit ervaring blijkt dat RTS'en werken met meetcycli waarbij de verzamelde meetdata eens per uur wordt geüpload naar de server. Ervan uitgaand dat deze handeling en eventueel noodzakelijke bewerkingen meteen worden uitgevoerd, dan is de maximale vertraging tussen een meettijdstip en de beschikbaarheid van de gegevens circa een uur. Dit blijkt in de praktijk acceptabel.

Mocht het monitoringssysteem worden getroffen door een storing, dan valt de stroom van feedbackinformatie weg en wordt er 'blind' geboord. Die situatie is onwenselijk, vandaar dat de uitvoerder van de monitoring vaak (contractueel) verplicht is een storing binnen een zo kort mogelijke termijn op te lossen. In de praktijk wordt daarvoor vaak een termijn van vier uur gehanteerd, wat vanwege het relatief constant blijvende boorproces geen acuut probleem hoeft te zijn. Bij langere storingen komt – afhankelijk van onder andere de locatie van de TBM, de *past performance* en de verantwoordelijkheidsverde-

ling – een moment dat het boren moet worden stilgelegd vanwege het ontbreken van monitoringsgegevens. Het is aan te bevelen hier van tevoren (contractuele) afspraken over te maken om discussies voor te zijn.

Kwaliteitsborging
In de praktijk is het zeer waardevol gebleken om meteen aandacht te besteden aan de kwaliteit van de monitoringsgegevens. Met andere woorden, gebruikers moeten niet hoeven te twijfelen aan de inhoud en juistheid van de aangeboden informatie. Er komt veel data binnen en gebruikers hebben vaak niet de tijd of de vaardigheid om een kwaliteitscontrole of -correctie uit te voeren.

Het dataverwerkingssysteem kan zelf een aantal elementaire checks doen. Met name de detectie en het verwijderen van *outliers* (uitbijters), extreem afwijkende en daarmee onrealistische waarden, in een meetreeks is zeer waardevol. Dit soort fouten beïnvloedt de berekening van gemiddelde waarden sterk. Een andere zinvolle controle heeft betrekking op de eenduidigheid van reeksen zoals de positiegegevens van de TBM.

Naast de hierboven genoemde automatische controles is het aan te bevelen om (geselecteerde) gebruikers de mogelijkheid te bieden om (ruwe) meetreeksen eenvoudig visueel te controleren met een standaard grafiek op het beeldscherm en zo nodig als onrealistisch beoordeelde metingen handmatig te verwerken. Een dergelijke simpele maatregel levert, mits consequent toegepast, een significante bijdrage aan de kwaliteit van de (afgeleide) informatie.

Referentiewaarden en domeinwaarden
Een belangrijke functie van het dataverwerkingssysteem is het terugbrengen van de gegevens uit meetreeksen per meetpunt tot enkele betekenisvolle zakkingswaarden per TBM-passage (eveneens per meetpunt). Uiteraard kan deze aanpak ook gevolgd worden voor de x- en y-componenten van een verplaatsingsmeting, maar de zakking (in z-richting) vertoont vaak verreweg de grootste beïnvloeding en wordt daarom als indicator gebruikt. Hieronder wordt de aanpak beschreven zoals die succesvol is toegepast bij de Noord/Zuidlijn:

1. Voor elke meting in een meetreeks werd de (relatieve afstand) van de TBM ten opzichte van het betreffende meetpunt bepaald. Hierdoor kunnen de zakkingen worden uitgezet ten opzichte van de relatieve positie van de TBM (met het boorfront als nulpunt). Hiervoor worden de positiegegevens van de TBM gebruikt (een tijdreeks met elke vijf minuten een actuele waarde).
2. De nulwaarde voor het betreffende meetpunt is bijvoorbeeld te bepalen als gemiddelde van de metingen tussen 30 en 40 meter voor het boorfront. Op dezelfde wijze zijn de eindzakkingen te bepalen (bijvoorbeeld het gemiddelde tussen 30 en 40 meter áchter het boorfront). Ook op tussenliggende (vaste) posities kunnen zakkingen worden bepaald, zoals ter hoogte van het boorfront of ter hoogte van de staartspleet (weliswaar over kortere zones).
3. De vorige stap levert, per meetpunt en per TBM-passage, een aantal domeinwaarden op voor de zakkingen per processtap. Door deze waarden voor een reeks van meetpunten op de as van de tunnel uit te zetten, ontstaat er een goed beeld van de zakkingen langs het boortracé. Overigens werkt deze aanpak voor alle meetpunten, dus ook voor prisma's op gebouwen waarvoor zakkingscriteria gelden.
4. In een separate analyse werden gegevens over het boorproces verzameld die eveneens konden worden gerelateerd aan posities langs het boortracé. De grafieken van de zakkingen en van belangrijke boorparameters (op dezelfde schaal) verschaften inzicht in de empirische relaties en trends die gebruikt werden voor het opstellen van boorinstructies.

De hiervoor geschetste aanpak is bij de Noord/Zuidlijn wat betreft de stappen 1 tot en met 3 geautomatiseerd uitgevoerd voor beide passages (er was sprake van twee tunnelbuizen) van alle meetpunten in het invloedsgebied van de boortunnel.

3.3.3 Visualisatie en distributie van informatie

Om de gegevens uit het monitoringssysteem inzichtelijk te maken voor gebruikers wordt veelvuldig gebruikgemaakt van grafieken een (GIS-)kaartbeelden. Daarnaast blijkt er in de praktijk ook behoefte aan (gestandaardiseerde) rapportagefuncties.

Online visualisatiemogelijkheden

Bij de Noord/Zuidlijn was voor vrijwel alle gebruikers de online-werkomgeving hét middel om toegang te krijgen tot de monitoringsdata en de analyseresultaten. Dat gold niet alleen voor de medewerkers van opdrachtgever en opdrachtnemer in de keet 'boven', maar ook voor de ploegen op de TBM (voorzien van een internetverbinding) en voor direct-betrokkenen op andere locaties (bijvoorbeeld thuis voor piketmeldingen). De basis werd gevormd door een web-GIS waarmee in één oogopslag zowel de actuele status van de meetpunten (volgens het stoplichtsysteem) als de positie van de TBM kon worden weergegeven. Daarnaast bood het systeem de mogelijkheid voor het opvragen van grafieken zoals:

- Meetreeksen van meetpunten ten opzichte van de tijd (zowel de ruwe data als eventuele doorgevoerde correcties), inclusief de geldende signaalwaarden voor het betreffende meetpunt.
- Een meetreeks per meetpunt ten opzichte van de relatieve TBM-posities (met als referentie het boorfront), inclusief de geldende signaalwaarden en de ingestelde rekendomeinen met domeinwaarden.
- Domeinwaarden (onder andere eindzakkingen) van een selectie van meetpunten uitgezet tegen de metrering van het tunneltracé.

Een web-GIS biedt ook de mogelijkheid om aanvullende informatie op te vragen, zoals de ligging van kabels en leidingen, de locaties en resultaten van grondonderzoek (sonderingen en boringen) en de locaties (en eventuele resultaten) van aanvullende metingen zoals peilbuizen. Via de online-werkomgeving was het mogelijk om specifieke selecties van data te downloaden voor verder gebruik.

Rapportage

Aanvullend op de online-werkomgeving is er ook behoefte aan verslaglegging van de monitoringsresultaten op papier of digitaal (als pdf-bestand). Toepassingen zijn onder ander de toetsing van (contractuele) zakkingseisen, het informeren van gebruikers/eigenaren van objecten en het in een overdrachtsdossier kunnen opnemen van de zakkingsprestaties tijdens de uitvoering. Uit ervaring blijkt dat bij de rapportage vooral flexibiliteit wat betreft dataselectie en lay-outmogelijkheden belangrijk is.

Alarmfuncties

Aanvullend op een GIS-beeld met stoplichtindicaties per meetpunt kan het dataverwerkingssysteem zo ingericht worden dat er e-mails of sms-berichten worden gestuurd bij de overschrijding van vooraf ingestelde signaalwaarden voor meetpunten.

3.4 Praktijkervaring

Het uitvoeren van een grootschalig monitoringsprogramma zoals bij de Noord/Zuidlijn kent vele praktische uitdagingen. Dat varieert van het dagelijkse gebruik door (interne) betrokkenen bij het project tot het uitleggen van nut en noodzaak ervan aan externe stakeholders. In deze paragraaf wordt ingegaan op de belangrijkste praktijkervaring bij de uitvoering en de praktische toepassing van de monitoring van de boortunnel.

Om te beginnen worden de belangrijkste ervaringen met het systeem behandeld. In de daaropvolgende paragrafen komen de belangrijkste uitvoeringservaringen met zowel de bewaking van zakkingen als de optimalisatie van het boorproces aan de orde.

3.4.1 Ervaringen met het monitoringssysteem

Na de Hubertustunnel was de boortunnel van de Noord/Zuidlijn een tweede project waarbij op grote schaal gebruik is gemaakt van automatische monitoring van zowel maaiveld als gebouwen nabij de tunnel. Het systeem werd gekenmerkt door het streven naar volledige waarneembaarheid: overal waar gemeten kón worden, wérd ook gemeten.

De resultaten van de uitvoering van het boorproces waren zeer goed. Naast een goede kwaliteit van de tunnelbuizen en een goede voortgang, was de omgevingsbeïnvloeding door het boren zeer gering. Zakkingen waren veel kleiner dan waarmee vooraf rekening was gehouden en er was sprake van slechts enkele schademeldingen waarbij er een (mogelijk) verband was met de boortunnel. Hierbij heeft het monitoringssysteem een belangrijke rol gespeeld.

Kwaliteit van de metingen

Zoals ook al bij de Hubertustunnel was ervaren, bleek bij de Noord/Zuidlijn de kwaliteit van de metingen verrassend goed. Dat kwam door het relatief geringe aantal meetfouten in de meetreeksen, maar ook door de beschikbaarheid van metingen die daadwerkelijk gerealiseerd kon worden (ook de reflectorloze metingen in de drukke stedelijke omgeving). In het algemeen vormde de redundantie in het meetsysteem een belangrijke factor, zowel door het aantal meetpunten als door de relatief hoge meetfrequentie. Door de dichtheid van het meetnet konden meetreeksen van nabijgelegen meetpunten onderling vergeleken, getoetst en gecorrigeerd worden. Door het meetinterval van een uur was er per meetpunt voldoende (reserve-)data beschikbaar om een goed beeld te verkrijgen van het relatief snel ontwikkelende zakkingspatroon rond een passerende TBM.

Waarneembaarheid van het proces

De monitoring bestond in de praktijk, afgezien van de peilbuizen, volledig uit de verplaatsingsmetingen van maaiveld en gebouwen. Bij de boortunnel is geen gebruikgemaakt van ondergrondse metingen met inclino- en extensometers. De apparatuur daarvoor was op diverse locaties langs het tracé wel aangebracht, maar produceerde geen bruikbare data. Dat was onder andere het gevolg van de lange periode tussen aanbrengen en het moment van meten (door de vertragingen van het project) en door de relatief kleine beïnvloeding (verplaatsingen) door het boorproces die lastig waar te nemen is.

Omdat de boortunnel grotendeels het stratenpatroon volgde en de reflectorloze metingen op het wegdek boven de tunnel-as goed functioneerden, konden de zakkingen goed waargenomen worden.

Dataverwerking

De belangrijkste eigenschappen van de dataverwerking bleken enerzijds een snelle en efficiënte kwaliteitscontrole (en zo nodig correctie) en anderzijds de automatische correlatie van zakkingsmetingen met het boorproces en de daaruit voortkomende 'kengetallen' voor de zakkingen per meetpunt. Beide processen vergen, ondanks de in eerste instantie geautomatiseerde dataverwerking, overigens wel enig handwerk. Een mens kan immers in een oogopslag zien of er iets mis is met een meting of bij de bepaling van afgeleide grootheden. Een gebruiksvriendelijk systeem dat eenduidige visualisaties (grafieken) genereert van de relevante metingen én de mogelijkheid biedt om eenvoudig handmatige correcties en analyses uit te voeren, is ideaal. Een site-engineer die gemiddeld een half uur per dag besteed aan het bijhouden van de meet- en analyseresultaten kan met zo'n systeem een groot verschil maken.

Contourplots
Door het zeer uitgebreide monitoringsprogramma was het mogelijk om een volledig beeld van de omgevingsbeïnvloeding op te bouwen. Met de maaiveldmetingen op de dwarsraaien was het ook mogelijk om de vorm van de zakkingskromme te identificeren. Met die informatie konden zakkingen op de as worden geëxtrapoleerd en vervolgens worden gevisualiseerd in contourplots van het daadwerkelijk opgetreden invloedsgebied. Dat gaf inzicht in de grootte, de spreiding en (belangrijk!) de gelijkmatigheid van de opgetreden zakkingen. Met name externe stakeholders zoals kabel- en leidingenbeheerders en het GVB waren goed bediend met deze vorm van informatie.

Extra functies
Omdat voor de correlatie van de zakkingen met het passerende boorproces ook de positiegegevens van de TBM in het systeem beschikbaar waren, werd het systeem in de praktijk ook gebruikt om de voortgang te monitoren en snel de actuele locatie van de TBM op te vragen. Daarmee kon bijvoorbeeld snel bepaald worden waar de 'hierzijnwij.nu'-pijl zowel op de website als op straat geplaatst moest worden. Dit gebeurde in principe drie keer per week.

Figuur 3.3 / Screenshot van de website met de 'hierzijnwij.nu'-pijl (links) en de pijl in het echt op straat.

3.4.2 Bewaking zakkingen

Tijdens de uitvoering is het monitoringssysteem continu gebruikt voor het bewaken van de optredende zakkingen. Ten minste één keer per dag werd met het GIS-beeld gecontroleerd hoe groot de actuele zakkingen waren (tijdens de opstartfase en/of bij kritische passages zoals de Beurs van Berlage en de Bijenkorf nog wel vaker). Daarbij werd meestal als eerste gekeken naar de kleurcodering van de geselecteerde meetpunten die een indicatie gaven van de zakkingen ten opzichte van de vooraf bepaalde signaalwaarden. Daarnaast bleek in de praktijk vooral interessant wat de actuele ontwikkeling is van de zakking op de as van de tunnel (uitgezet tegen de metrering) en hoe groot het invloedsgebied is (de verste punten die nog invloed van het boorproces vertonen).

Alarmberichtjes
Het dataverwerkingssysteem voor de monitoring bij de Noord/Zuidlijn bood de mogelijkheid om individuele gebruikers berichtjes te laten ontvangen per sms of e-mail als er bepaalde signaalwaarden werden overschreden. In de praktijk ontstond er een haat-liefde-relatie tussen de gebruikers en dit systeem. Vanwege het grote aantal meetpunten en de

hoge meetfrequentie werden veel onterechte alarmmeldingen verzonden (letterlijk duizenden). Er zijn voor de boortunnel zelfs nauwelijks 'echte' alarmmeldingen geweest. Desondanks gaf het systeem betrokkenen het vertrouwen dat er altijd een vorm van bewaking actief was zonder in te loggen en de schermen te controleren. Bovendien werd snel de ervaring opgebouwd om in te schatten of een melding realistisch was. Het per e-mail meesturen van de grafieken van betreffende metingen is erg handig, omdat deze meteen even gecontroleerd kan worden (zeker bij het gebruik van smartphones).

De bewakingsdriehoek
De alarmberichtjes vormen één van de hoeken van de eerder in PARAGRAAF 3.2.4 genoemde bewakingsdriehoek. Dat principe houdt in dat als iets bijzonders gebeurt met van één van de drie aspecten in het rijtje gemonitorde zakkingen, maaiveld ('boven') of het boorproces, er meteen extra aandacht besteed wordt aan de andere twee. Dat is veelvuldig toegepast. Regelmatig zijn bijvoorbeeld de gemonitorde zakkingen extra opgevraagd of is de situatie 'boven' extra gecontroleerd nadat er bij het boren iets afwijkends was voorgevallen. Andersom zijn bij (vermeende) schademeldingen altijd even de monitoringsresultaten gecontroleerd en is nagegaan waar de TBM zich bevond en of er bijzonderheden waren voorgevallen. In de praktijk hielp het dat er gedurende het boren altijd een vertegenwoordiger van de opdrachtgever (toezichthouder) op de TBM aanwezig was die als waarnemer en contactpersoon fungeerde.

Relatie tussen 'onder' en 'boven'
De hierboven geschetste aanpak vereist een snel schakelen tussen 'onder' en 'boven', oftewel de TBM en het maaiveldniveau. Dat is in de praktijk lastiger dan het lijkt. Op de TBM bestaat geen enkele fysieke referentie aan de omgeving (afgezien van de monitor met het GIS-beeld) en op maaiveld is het zo mogelijk nog lastiger om aan te geven waar de TBM zich precies bevindt. De sleutel om 'onder' en 'boven' te koppelen is de (kilo)metrering. De (unieke) metrering van het booralignement speelt sowieso al een belangrijke rol tijdens het boorproces, bijvoorbeeld voor de eenduidigheid in positie-informatie bij start- en eindpunt. Het is een getal dat altijd meteen is af te lezen op het dashboard van de TBM. Voor elk meetpunt nabij de tunnel kan de metrering en de afstand worden bepaald door het te projecteren op het dichtstbijzijnde punt op het alignement. Door de metrering van de meetpunten te vergelijken met de actuele positie van de TBM en ook de afstand van dat punt ten opzichte van het boortracé te controleren, is snel te bepalen welke punten in het invloedsgebied liggen.

Bij de Noord/Zuidlijn is voorafgaand aan het boren een zogeheten huisnummerboekje gemaakt. Dit was niets anders dan een ringbandje (op A5-formaat en een goede kaft) met daarin het hele alignement weergegeven op een GIS-plattegrond van het tracé. In die plattegrond was onder andere het tunneltracé met metrering (om de 10 meter) en alle afzonderlijke panden met straatnamen en huisnummers opgenomen. Door de metrering even op te vragen bij de TBM (of af te lezen in het dataverwerkingssysteem) kon met het huisnummerboekje meteen worden ingeschat of er bij meldingen uit de omgeving een verband met het boren mogelijk was.

Deskundigheid
Ondanks alle technische hulpmiddelen en de fraaie visualisaties bleek wel enige deskundigheid en ervaring vereist bij het interpreteren van monitoringsgegevens en de correlatie daarvan met het boorproces. Met name het omgaan met meetfouten en andere vreemde verschijnselen in de metingen vraagt om aandacht. Het loont de moeite om, met name in het begin, met alle betrokkenen gezamenlijk de beschikbare metingen door te lopen en te bespreken hoe die moeten worden geïnterpreteerd en welke spelregels gelden voor de bewaking en alarmering. Er moet een intelligent evenwicht worden gevonden tussen het wegfilteren van valse meldingen en het negeren van belangrijke indicatoren.

3.4.3 Optimalisatie van het boorproces

Er is tijdens het boren van de Noord/Zuidlijn continu sprake geweest van een verbetering van de boorprestaties, en daar heeft het monitoringssysteem en de daarmee verbonden data-analyse zeker een rol bij gespeeld. De aannemer was bij de Noord/Zuidlijn niet verantwoordelijk voor zakkingen, maar had een inspanningsverplichting om zo goed mogelijk te boren. Daarnaast was een niet onaardige bonus beschikbaar voor de bouwschade die voorkomen werd (30 procent van het restant van de risicoreservering voor bouwschade).

In de praktijk werd eigenlijk volledig gestuurd op de maaiveldzakkingen op de as van de tunnel. Zolang de indicatoren daarvoor in het groene en gele bereik zaten in het web-GIS was er geen schade in de omgeving te verwachten. Het doel van de projectleider voor het boorproces was dan ook om instructies voor de boorploegen te formuleren die alleen groene en gele signaleringen tot gevolg hadden. Dat is succesvol gebleken (op enig moment was zelfs alleen groen goed genoeg). Die boorinstructies werden geformuleerd op basis van vuistregels die waren afgeleid van de trends in de relatie tussen zakkingen en boorinstellingen. Er was geen sprake van het van dag tot dag bijregelen van het boorproces, maar wel van een continue '*plan-do-act-check*'-cyclus die leidde tot een structurele verbetering van het proces.

3.4.4 Communicatie

Een groot infraproject in een stedelijke omgeving kent vele betrokkenen en belanghebbenden. Dat geldt ook voor het aan het project verbonden monitoringsprogramma, en helemaal bij een boortunnel waarbij het monitoringssysteem langs het tracé eigenlijk het enige zichtbare deel is. Daardoor speelt de monitoring een belangrijke rol in de communicatie over het project: waarvoor wordt het gebruikt, wat heeft de omgeving eraan en wat is de impact van het systeem? De ervaringen bij de Noord/Zuidlijn bevestigen de aanbevelingen in [1] met betrekking tot de externe communicatie naar de omgeving over monitoring.

Zakkingen als gevolg van een regulier boorproces versus calamiteiten

Misschien wel de belangrijkste boodschap met betrekking tot het monitoringssysteem is dat het geen garantie biedt tegen verzakkingen als gevolg van calamiteiten. De monitoring helpt de relatief grote kans op geringe schade te verkleinen, maar het heeft nauwelijks invloed op de relatief kleine kans dat er tijdens het boren een ernstig probleem ontstaat met grote verzakkingen tot gevolg.

In de nasleep van de grote verzakkingen als gevolg van de werkzaamheden bij station Vijzelgracht in de zomer van 2008 ontstond er verwarring over de functie van de monitoring. Het boren zou pas later beginnen (uiteindelijk in 2010), maar hoe kon er veilig geboord worden als het monitoringssysteem een probleem als bij de Vijzelgracht niet kon voorkomen? De oplossing lag in het nadrukkelijk onderscheid maken tussen de grote kans op kleine onvolkomenheden (bij een goed verlopend boorproces) versus de zeer kleine kans op calamiteiten met grote gevolgen. In het eerste geval is sprake van kleine schades – scheuren in stucwerk, een klemmende deur, een barst in een ruit – die goed te herstellen zijn; iets wat in voorkomende gevallen vanuit het project voortvarend ter hand genomen werd. Dergelijke schades vormen, hoe vervelend ook, geen risico voor de constructie of de veiligheid. Ze kunnen voorkomen worden door het boorproces nog verder 'bij te regelen' op basis van metingen van optredende zakkingen. En daarmee werd de functie van het monitoringssysteem duidelijk: het waarnemen van zelfs de geringste zakkingen, het liefst zo dicht mogelijk bij de bron (het wegdek boven de tunnel). Dit betreft invloed door het boorproces die met het blote oog niet waarneembaar is en dus geavanceerde meetapparatuur vereist.

Als er écht iets misgaat (het calamiteitenscenario), dan is dat direct duidelijk en helpt een monitoringssysteem ook niet om dat te voorkomen. Bij een calamiteit helpt de monitoring overigens wel om de exacte omvang ervan snel in beeld te brengen, een functie die niet onderschat moet worden.

Het invloedsgebied

Een ander belangrijk begrip bij de (omgevings)communicatie over het boorproces en de monitoring was het invloedsgebied. De meeste eigenaren en gebruikers van gebouwen nabij de boortunnel vinden het een goed idee dat hun pand gemonitord wordt. Is het niet als bewaking ter voorkoming van (onverwachte) verzakkingen, dan in ieder geval om beïnvloeding door het boorproces te kunnen aantonen en daarmee een eventuele schadeclaim te onderbouwen. Daarom was er soms weinig begrip voor het niet-monitoren van een object en werd van de projectorganisatie geëist dat alsnog te doen. In de praktijk betekende het niet-monitoren van een gebouw dat het (ruim) buiten het invloedsgebied stond; alle objecten binnen het invloedsgebied werden immers gemonitord. Een uitleg over dat invloedsgebied met een duidelijke afbeelding van de spreiding van de gronddeformaties van de bron (de TBM) naar boven is zeer nuttig gebleken. Daarmee kon het verband tussen het niet-monitoren en het afwezig zijn van zakkingsrisico's uitgelegd worden, wat over het algemeen goed ontvangen werd. Vanuit het project kan het idee ontstaan om op verzoek toch te gaan monitoren buiten het invloedsgebied, maar dat is vaak een zeer kostbare keuze zonder dat er een technische noodzaak voor bestaat.

Naast een uitleg over het (geometrische) invloedsgebied was ook de periode waarin gemonitord werd een belangrijk onderwerp. Met name het moment waarop gestopt wordt met de automatische monitoring vraagt om een zorgvuldige uitleg. Hoewel de ervaring leert dat de effecten van het boren binnen maximaal enkele weken zijn uitgewerkt, wordt het soms als onprettig ervaren als de metingen daadwerkelijk worden gestopt ('je kunt nooit weten'). Tijdig (vooraf) de verwachtingen uitspreken helpt in dit verband. Daarnaast kan uitgelegd worden dat het 'snelle' automatische systeem weliswaar stopt met meten, maar dat altijd kan worden teruggevallen op de meetboutjes en precisiewaterpassingen (die meetboutjes kunnen gewoon blijven zitten).

Het aanbrengen van het meetsysteem

In de vorige paragraaf kwam de communicatie over de nut en noodzaak van de monitoring aan de orde. Voor de gebruikers en eigenaren van objecten die gemonitord moeten worden, is het belangrijk dat zeer zorgvuldig wordt gecommuniceerd over wat het daadwerkelijk aanbrengen van meetapparatuur (RTS'en) en meetpunten betekent. Er is immers wel sprake van enige overlast. Ook het verwijderen ervan moet zorgvuldig gebeuren, waarbij elke vorm van schade (boutgaten) zorgvuldig en professioneel hersteld moet worden.

Figuur 3.4 / Installatie tweede total station voor (reflectorloos) meten maaiveld. (Bron: Dienst Noord/Zuidlijn)

4 Diepe bouwputten Noord/Zuidlijn

4.1 Inleiding

De diepe stations die zijn aangelegd voor de Noord/Zuidlijn zijn gelegen in het historische centrum van Amsterdam, aan het Rokin, de Vijzelgracht en de Ceintuurbaan. De stations zijn meestal circa 30 meter diep, hebben een breedte van 11 tot 24 meter en een lengte van 150 tot200 meter. De wanden van de stations zijn gevormd door betonnen diepwanden tot een diepte van 45 meter. In het station zijn diverse ondersteunende stempellagen aangebracht in de vorm van stalen stempels (tijdelijk en permanent) en betonnen vloeren (permanent). Ook is er op diepte een groutstempel aangebracht (onder de diepste vloer). Zie voor meer details over het ontwerp van de stations Salet et al. (2006) [5], Delfgaauw et al. (2009) [6], Driesse et al. (2008) [7] en De Wit et al. (1999) [8].

Bij de aanleg van de diepe stations van de Noord/Zuidlijn is gebruikgemaakt van een uitgebreid monitoringssysteem voor zowel de constructie als de omliggende gebouwen en de ondergrond. Voor 2008 werd het monitoringssysteem al ontworpen, maar in 2008 (tijdens het ontgraven van het station Vijzelgracht) zijn door twee ernstige lekkages verzakkingen opgetreden aan naastgelegen historische panden. Door die incidenten is het werk voor langere tijd gestaakt en is vanaf 2009 bij herstart van de werkzaamheden deels een andere aanpak gevolgd dan daarvoor. Dit hoofdstuk beschrijft enkele specifieke situaties vanaf 2009, maar zal op sommige plaatsen aandacht schenken aan de verschillen met de periode voor 2008. Meer informatie over de periode voor 2008 is te vinden in Cook et al. (2011) [9], Cook et al. (2007) [10], Netzel en Kaalberg (1999) [11], Cook (2006) [12], Netzel en Kaalberg (2001) [13] en De Nijs en Buykx (2010) [14].

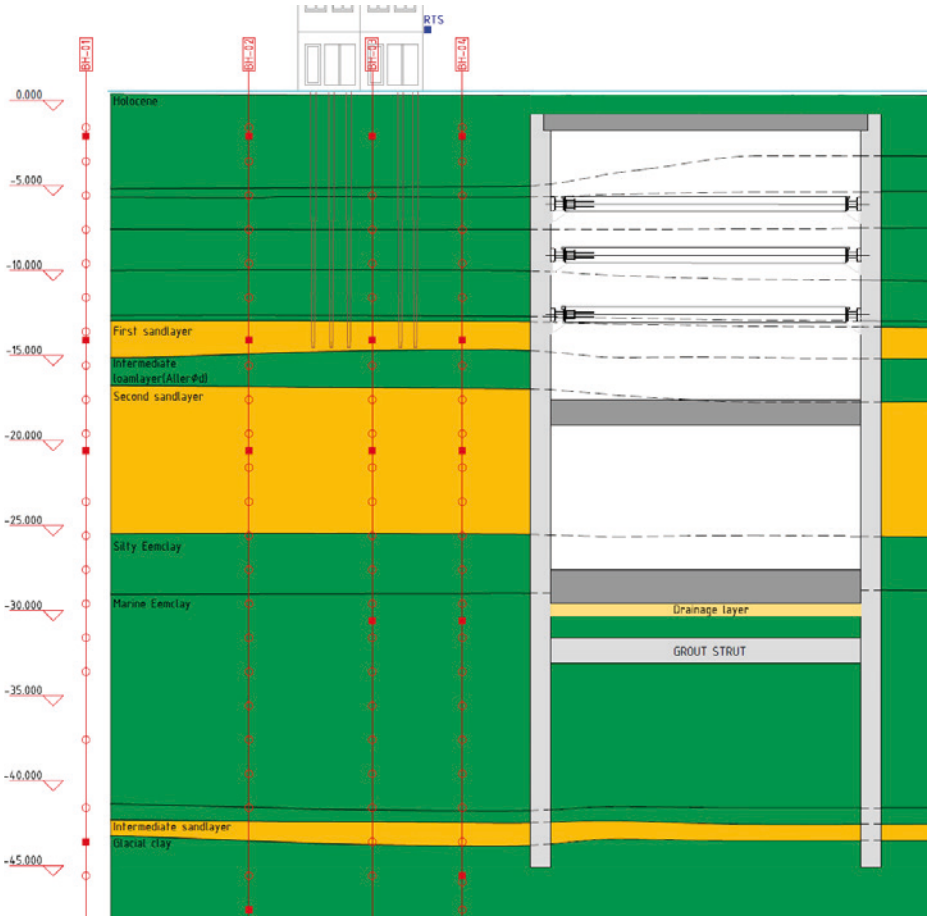
In dit hoofdstuk wordt een selectie gegeven van de praktijkervaringen, voornamelijk uit de fasen na 2008. Het hoofdstuk gaat in op zowel het proces rondom de monitoring als de techniek van de monitoring, en beschrijft de praktijkervaringen met de monitoring. Aan het eind worden samenvattende conclusies gegeven. Verder zijn er REFERENTIES naar achtergronddocumenten, omdat de monitoringsactiviteiten zo omvangrijk zijn dat deze niet in het geheel in de tekst kunnen worden opgenomen.

4.2 Monitoring bij de diepe stations Noord/Zuidlijn

Bij de diepe stations zijn metingen uitgevoerd aan de gebouwen (handmatig en met prisma's in combinatie met *robotic total stations*, RTS'en) en aan de ondergrond (maaiveldmetingen, extensometers voor de verticale verplaatsing op diepte en inclinometers voor de horizontale verplaatsing op diepte). Daarnaast zijn er waterspanningen gemeten: binnen en buiten de stations in peilbuizen en met piëzometers en BAT-sensoren). Aan de constructie zelf zijn rekmetingen uitgevoerd op de stempels, inclinometingen in de diepwanden, en metingen van verticale verplaatsingen van de gehele constructie (meetbouten) en van het groutstempel (*tell tales*, een soort zakbaken). Voor een uitgebreide beschrijving van de monitoring per station wordt verwezen naar de rapporten die gemaakt zijn in het kader van het COB-onderzoek bij de Noord/Zuidlijn [15] [16] [17] [18]. Een samenvatting hiervan is te vinden in Korff en Kaalberg (2014) [19].

De ondergrond rondom de diepe stations is mede bepalend voor de insteek en het succes van de monitoring. De typisch Amsterdam-Centrumse bodem bestaat tot circa 12 meter diepte voornamelijk uit een ophooglaag met daaronder holocene slappe lagen (klei, veen en zand). Rond -12 meter treft men de eerste zandlaag aan waarop de meeste panden gefundeerd zijn. Daaronder volgt een tussenlaag (het Allerod) en daar weer onder de

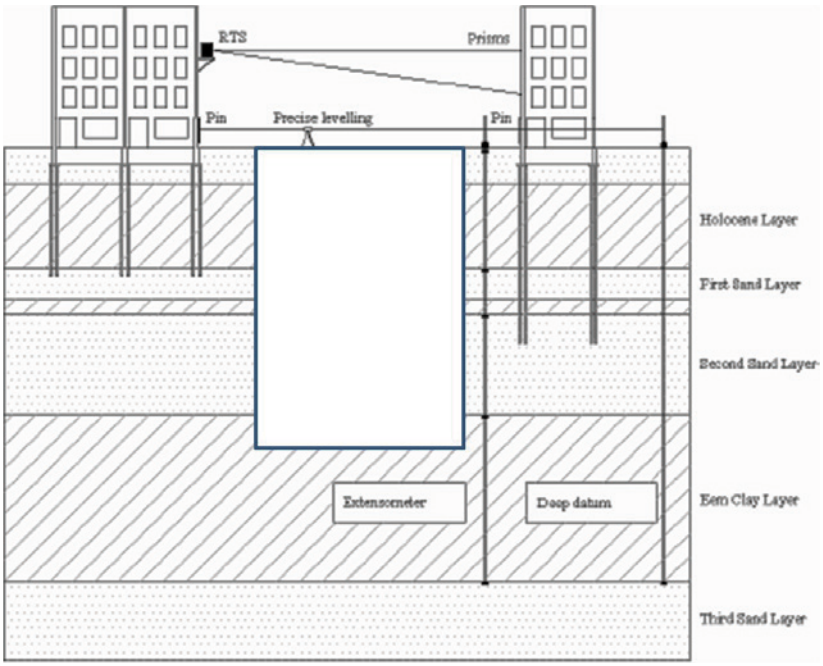
tweede zandlaag. De afsluiting van de bouwkuipbodems is gevormd door de hieronder gelegen Eemkleilaag en glaciale kleilaag. De stabiele basis wordt gevormd door de derde zandlaag. Op enkele locaties is ook nog een tussenzandlaag aanwezig tussen de verschillende kleilagen. Een voorbeeld van een doorsnede van het station en de bodem is gegeven in FIGUUR 4.1.Meer details over de bodem kunnen worden gevonden in de kennisbank van het COB (zie www.cob.nl/kennisbank zoek op 'soils rapport' [15]).



Figuur 4.1 / Schematische doorsnede station Vijzelgracht.

4.2.1 Monitoring van deformaties van gebouwen

Voor het meten van de verplaatsingen van de gebouwen langs de diepe stations is een uitgebreid, meestal automatisch, monitoringssysteem geïnstalleerd midden 2000. In totaal (ook voor de boortunnel) zijn 74 robotic total stations en 1700 prisma's op de gebouwen geplaatst (FIGUUR 4.2). Elke RTS controleert ongeveer 50 tot 100 prisma's. De verplaatsing van het prisma wordt gemeten in drie richtingen (x, y en z). Metingen van de RTS zijn gerefereerd aan andere RTS-locaties buiten de invloedssfeer van de werkzaamheden. Prisma's bevinden zich aan de voorzijden en de wand van het gebouw, gewoonlijk ten minste vier per gebouw. Secundaire instrumentatie bestaat uit nauwkeurige handmatige metingen en referentiemetingen naar diepe vaste punten in de derde zandlaag buiten de zone van invloed. Deze zijn ook gebruikt voor de extensometerkoppen. Het secundaire systeem wordt voornamelijk gebruikt als een reservesysteem en wordt gemeten met intervallen van zes tot twaalf maanden. Verdere details over de gebouwmetingen zijn te vinden HOOFDSTUK 3 over de boortunnels.

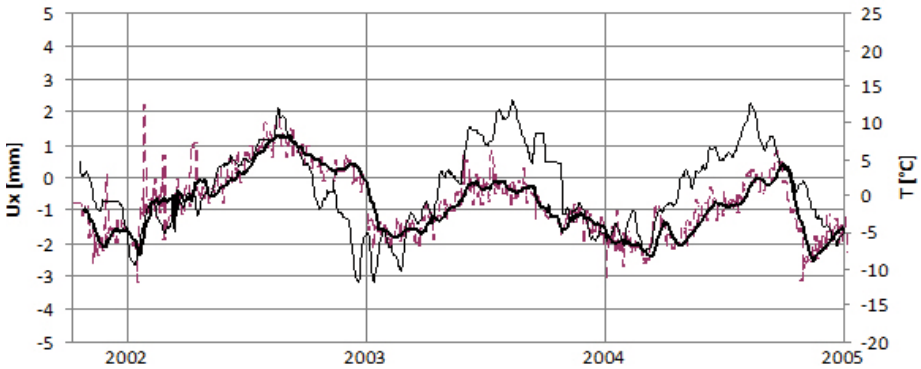


Figuur 4.2 / Gebouwmonitoringssysteem.

Om de grote hoeveelheid gegevens te verwerken, zijn softwaretoepassingen ontwikkeld. De toepassingen maken gebruik van het GIS als userinterface, zie onder andere Netzel en Kaalberg (1999) [11]. Het GIS is ontwikkeld om gegevens op te slaan, te analyseren, te structureren en te visualiseren bij het risicomanagement. Van elk gebouw binnen de invloedszone zijn talrijke gegevens opgeslagen, zoals de staat van fundering, een foto van de oorspronkelijke staat met prismalocaties, eigenaargegevens en de details van het gebruik van het gebouw. Details van het systeem, de nauwkeurigheid en sensoren is te vinden in COB (2011) [15] en in Kaalberg et al. (2003) [20]. Meer informatie over het GIS-systeem en de controle voorafgaand aan de bouw kan worden gevonden in Cook et al. (2007) [10].

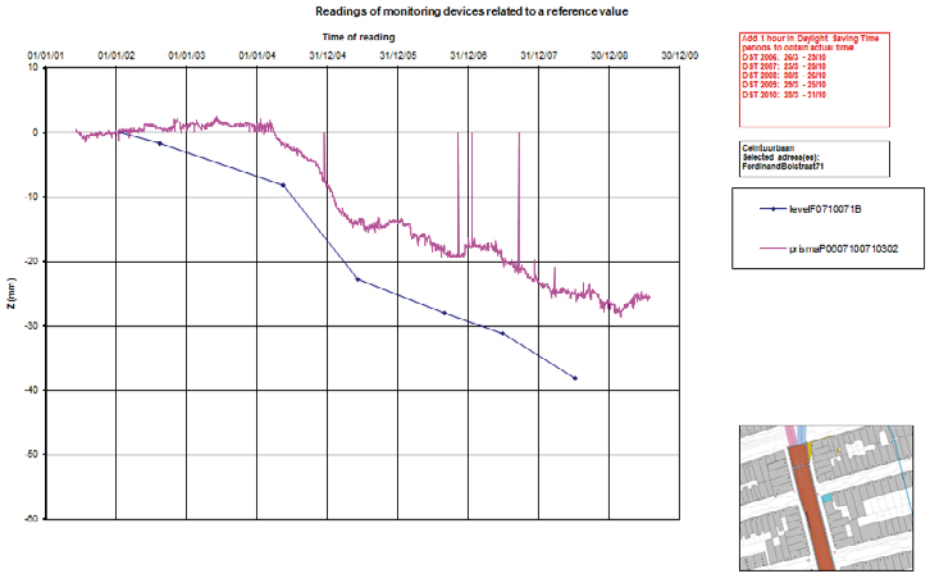
Praktijkervaringen

Het automatische gebouwmonitoringssysteem heeft een hoge resolutie. Temperatuursinvloeden kunnen aanzienlijk zijn ten opzichte van de totale gebouwvervorming, vooral als over een kort tijdsbestek wordt gekeken (enkele dagen). De plaats van het prisma aan de zon- of schaduwzijde van gebouwen heeft eveneens invloed, zie FIGUUR 4.3, Korff et al. (2011) [21] en Cook et al. (2007) [10].



Figuur 4.3 / Temperatuureffecten in een gebouw.

Het automatische monitoringssysteem was niet gekoppeld aan vaste referentiepunten, waardoor een verschil aanwezig was tussen de prismametingen en de handmatige metingen. Door de optredende achtergrondzakking in Amsterdam kon dit verschil oplopen tot enkele millimeters per jaar, over een periode van tien jaar tot een totaal van 10 tot 20 millimeter, zie FIGUUR 4.4.



Figuur 4.4 / Afwijking in de tijd tussen prismametingen (relatief, exclusief achtergrondzakking) en handmatige metingen (absoluut, inclusief achtergrondzakking).

Het toepassen van meerdere prisma's (en handmatige metingen) op een gebouw is zinvol geweest om de helling van de gebouwen te bepalen en een betere inschatting van de schadecategorie te kunnen maken. Metingen aan de achtergevels (zowel horizontaal als verticaal) zouden dit proces nog verder hebben verbeterd, maar was logistiek gezien vrijwel onmogelijk. Een lange periode van metingen voorafgaand aan de bouw zorgt voor een goed inzicht in het natuurlijke gedrag van de gebouwen (doorgaande zakkingen en temperatuurseffecten). In Amsterdam was een periode van veelal drie jaar beschikbaar (zie FIGUUR 4.5); dit is wellicht erg ruim, maar een jaar is toch wel minimaal vanwege het vaststellen van seizoensinvloeden.

Figuur 4.5 / Basismonitoring voorafgaand aan de bouw.

Aanzienlijke zakkingen zijn geconstateerd tijdens de eerste fasen van de bouw bij de diepe stations (Korff, 2013) [22]. Zorg dus dat het monitoringssysteem op tijd operationeel is.

De gebouwmonitoring werd gebruikt voor communicatie naar de omwonenden. Hiervoor werden geaggregeerde kaarten gebruikt waarop voor elk pand maximale horizontale en apart de verticale verplaatsingen zijn gegeven in eenheden van 10 millimeter. Voor deze metingen werden de prismawaarden gebruikt (en niet de handmatige metingen). Relatief vaak was er discussie over de verschillen tussen de metingen. Het hanteren van een kleurcodering van groen naar rood, waarbij het maximum van de oorspronkelijk maximale verplaatsing (25 millimeter) rood was, zorgde ook voor mogelijk onnodige onrust. Andere moeilijk uitlegbare punten waren de rebasing (herijking) van de prisma's, waardoor sprongen in de data voorkwamen zonder oorzaak van buitenaf. De beste communicatievorm richting bewoners was echter vooral het voeren van keukentafelgesprekken met vertegenwoordigers van de omwonenden. Hierbij is open uitgelegd wat voor bewegingen geconstateerd zijn en hoe schade ontstaat en ook hoe niet. Er was veel ruimte voor en behoefte van de bewoners aan het stellen van vragen.

Soms bleven er vragen gesteld worden over mogelijke schades, terwijl naar mening van de Dienst Noord/ Zuidlijn er overduidelijk geen relatie aanwezig was tussen aanwezige (oude) scheuren en de bouw van het station. Zo was er bijvoorbeeld een situatie waarin ondanks veelvuldig overleg, ook met externe specialisten, er toch zorgen bleven bij bewoners. Vervolgens is overlegd met de bewoners hoe deze zorgen toch weggenomen konden worden en is afgesproken om scheurwijdtemeters te plaatsen die door de bewoners zelf werden afgelezen. Na plaatsing van de meters is niets meer vernomen.

In 2012 waren alle stations ontgraven en was de funderingsvloer gereed. Daarmee waren de grootste risico's voor de omgeving geweken en kon de monitoring worden aangepast en geleidelijk grotendeels beëindigd worden. Een belangrijke beslissing binnen dit kader was de beëindiging van de automatische monitoring van de panden in de omgeving met robotic total stations. Er werd besloten om gedurende twee jaar nog om de twee maanden een handmatige waterpassing uit te voeren. Op die manier werd een kostenbesparing gerealiseerd van een factor vijfentwintig (een paar miljoen euro's). Belangrijk daarbij is dat handmatige metingen een gelijkwaardige nauwkeurigheid hebben en dat alleen de meetfrequentie afnam ten opzichte van de automatische metingen.

Doel van het doorzetten van metingen aan de omgeving was tweeledig. 1) De dienst Noord/Zuidlijn zag het als goed huisvaderschap om ook tijdens de laatste werkzaamheden goed te weten welke effecten er in de omgeving optraden. Er was nog een klein risico voor de omgeving door wijziging van gewicht van de stations (meer beton en staal, en stopzetten van de passieve bemaling in de drainagelaag onder de funderingsvloer) en door overpakken van stempeling. Omdat dit relatief trage processen zijn, kon dit goed worden gevolgd met de handmatige metingen. 2) Het voorkomen van onterechte claims; het aantoonbaar kunnen maken dat eventuele schade in de omgeving wel/niet veroorzaakt wordt door de bouw van de stations.

Technisch gezien betrof de overstap naar handmatige metingen geen uitdaging. Wel is vanaf het begin het risico onderkend dat de omgeving van het project handmatige metingen als ondergeschikt kon classificeren. Daarom is de overstap van automatisch naar handmatig meten meerdere keren besproken met de omgeving en zijn voor- en nadelen uitgebreid besproken. Daaruit kwam het belang naar voren om bij communicatie naar pandeigenaren wel dezelfde figuren van zakkingen te blijven hanteren. Daarom is de applicatie die de automatische monitoringgegevens beheerde ook tijdens de handmatige metingen in de lucht gebleven. Uiteindelijk is samen met 'actieve' omwonenden een brief opgesteld naar de andere omwonenden met uitleg over waarom, hoe en wat. De overgang is daarna vlekkeloos en geruisloos verlopen.

4.2.2 Monitoring van deformaties van de ondergrond

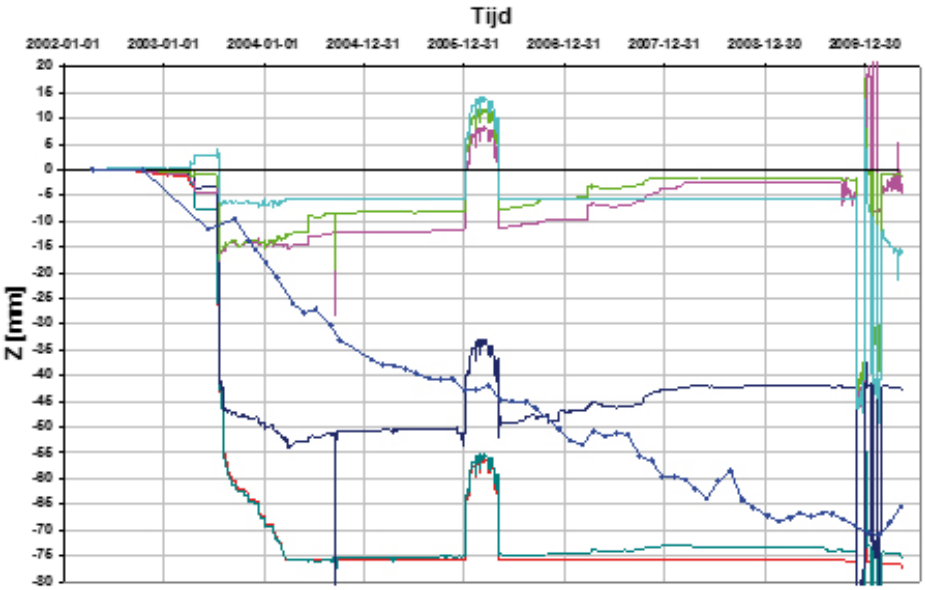
Speciaal voor gebouwen met diepe funderingen zijn de verplaatsingen op diepere lagen in de grond belangrijk. Daarom, en ter validatie van de ontwerpmodellen, zijn ondergrondse extenso- en inclinometers geplaatst.

Extensometers

Voor elk station zijn vier meetraaien geïnstalleerd voor ondergrondse metingen met behulp van extensometers en inclinometers tot een afstand van circa 50 meter van het station en 60 meter in de diepte. De extensometers hebben ankers op verschillende dieptes. De gebruikte meetinstrumenten zijn de Interfels *multi-point borehole* extensometer (MPBX) en de IPI *chain* extensometer. De opgegeven resolutie is 0,01% FS[1] (potentiometer) of 0,025% FS (trillende snaar). De gespecificeerde nauwkeurigheid was 0,2 millimeter. Gebleken is dat de locatie van de ankers kan variëren met ongeveer 0,5 meter ten opzichte van de theoretische diepte. De extensometers zijn veelal gerefereerd aan de vaste laag (derde zandlaag). Verwachte onnauwkeurigheid is opgebouwd uit 1 millimeter van de extensometer zelf, 1 millimeter van de handmatige referentie en 2 millimeter door de wrijving die zich kan voordoen tussen de instrumenten.

Praktijkervaringen

Extensometers presteren voldoende gedurende een lange periode, al is de nauwkeurigheid niet altijd gehandhaafd. Sommige extensometers raken buiten hun 'bereik' en moeten worden aangepast, zie een voorbeeld in FIGUUR 4.6. Wel zijn redelijk veel pieken of uitschieters in de metingen opgetreden die niet uit de werkzaamheden verklaarbaar waren. Zorg derhalve voor goede controle van de gegevens. Controleer ook de waarden van de zakking van de kop van de extensometer ten opzichte van het referentiepunt.



Figuur 4.6 / Onverklaarbaar afwijkende waarden extensometers en 'end of travel'.

Inclinometers

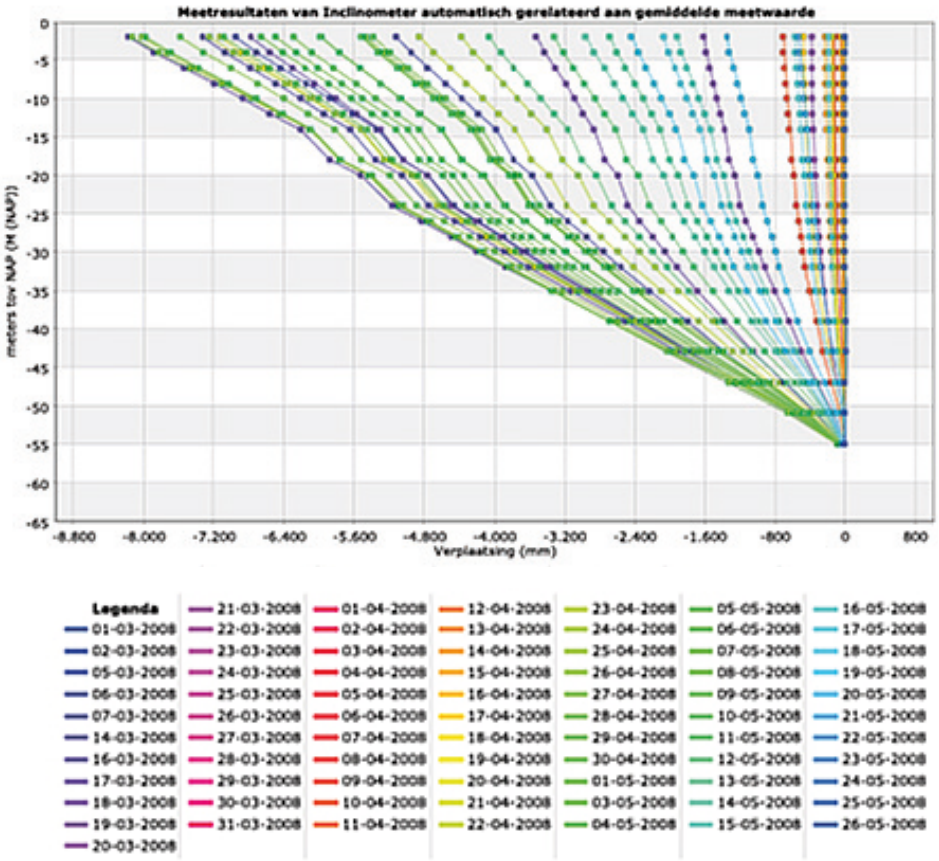
Langs dezelfde locaties en diepten als de extensometers zijn automatische inclinometers geplaatst. Een gecombineerde hellingmeter-extensometer is gebruikt, samen in een boorgat. Het eerste type inclinometer was de Inplace SISgeo magneto-resistieve sensor. De opgegeven herhaalbaarheid (info 2000) is 0,5% FS en de gespecificeerde nauwkeurigheid <0,5% FS Het tweede type inclinometer was de IPI mono-axiale chain.

1 FS: *full scale*

De gespecificeerde nauwkeurigheid is <0,5% FS De snaaropnemers (sensorlengte 1 meter) zijn met 2 meter afstand tussen de sensoren geplaatst. De nauwkeurigheid wordt vooral bepaald door de sensor (0,2% FS), de plaatsing van de groeven (spiraal) en het aantal metingen. Voor een reeks metingen met een sensor elke 2 meter (soms 4 meter) neemt de nauwkeurigheid verder af. De praktische systeemnauwkeurigheid van de hellingmeter is ongeveer +/- 0,3 inches per 100 voet, op basis van een groot aantal datasets. Dit betreft een combinatie van de systematische fout en de toevallige fout. De groeven van de casings moeten zo veel mogelijk afgestemd worden op de projectassen.

Daarnaast zijn enkele handmatige inclinometers geplaatst in de diepwanden. Zie hiervoor PARAGRAAF 4.2.5.

Praktijkervaringen
De automatische inclinometers in dit project hebben niet goed gewerkt. Er is een grote drift opgetreden, reeds na enkele jaren (zie voor een voorbeeld FIGUUR 4.7). Enkele extensometers en inclinometers tonen onrealistisch grote vervormingen tot ver beneden de diepte beïnvloed door de bouwactiviteiten (meer dan 5 millimeter). In Amsterdam zijn deze metingen nauwelijks gebruikt. De waarden zijn alleen bruikbaar voor verschilvervormingen over zeer korte tijdsintervallen.



Figuur 4.7 / Verlopende monitoringgegevens inclinometers.

Veel van de instrumenten zijn in de loop der tijd beschadigd of verplaatst ten gevolge van bouwactiviteiten, in het bijzonder in de vroege stadia van de bouw. Zelfs bij toepassing van verdiept aangelegde koppen is schade opgetreden (zie FIGUUR 4.8).

Figuur 4.8 / Beschadigingen koppen extenso- en inclinometers.

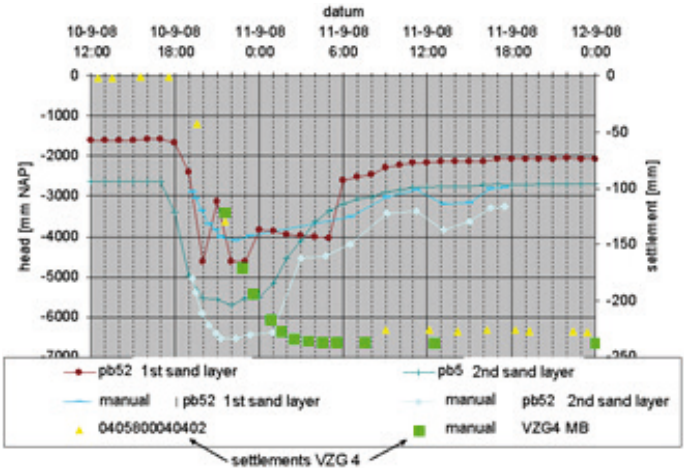
4.2.3 Monitoring van lekkages en de gevolgen

Bij aanvang van het project, tijdens het politieke debat over effecten, kosten en risico's van het project, werd het monitoringssysteem voorgesteld als een instrument dat waarschuwt voor afwijkingen van het voorspelde gedrag.

In juni en september 2008 zijn incidenten opgetreden naar aanleiding van twee ernstige lekkages in de diepwanden. Achteraf is vastgesteld dat deze lekkages zijn veroorzaakt door bentonietinsluitingen. Meer informatie over deze incidenten is te vinden in Bosch en Broere (2009) [23], Korff et al. (2011) [24] en Van tol en Korff (2011) [25].De grote zettingen die optraden tijdens de incidenten werden niet voorafgegaan door kleinere zettingen die de komende calamiteit zouden hebben kunnen aangegeven. Het verkrijgen van gegevens van de robotic total stations, die de gebouwbewaking verzorgen, vereiste aan het begin van het project een doorlooptijd van vier uur. Na het eerste incidentevenement werd besloten dat de periode tot twee uur in te korten.

Lekkage in diepwanden ontstaat pas bij toename van de ontgravingsdiepte, waardoor vooraf de instroom zeer gering is. Lekdetectie vooraf is moeilijk en soms onmogelijk. Geofysische methoden voor het opsporen van lekkages (bijvoorbeeld Texplor) zijn bovendien niet in staat onderscheid te maken tussen grote en kleine lekkages.

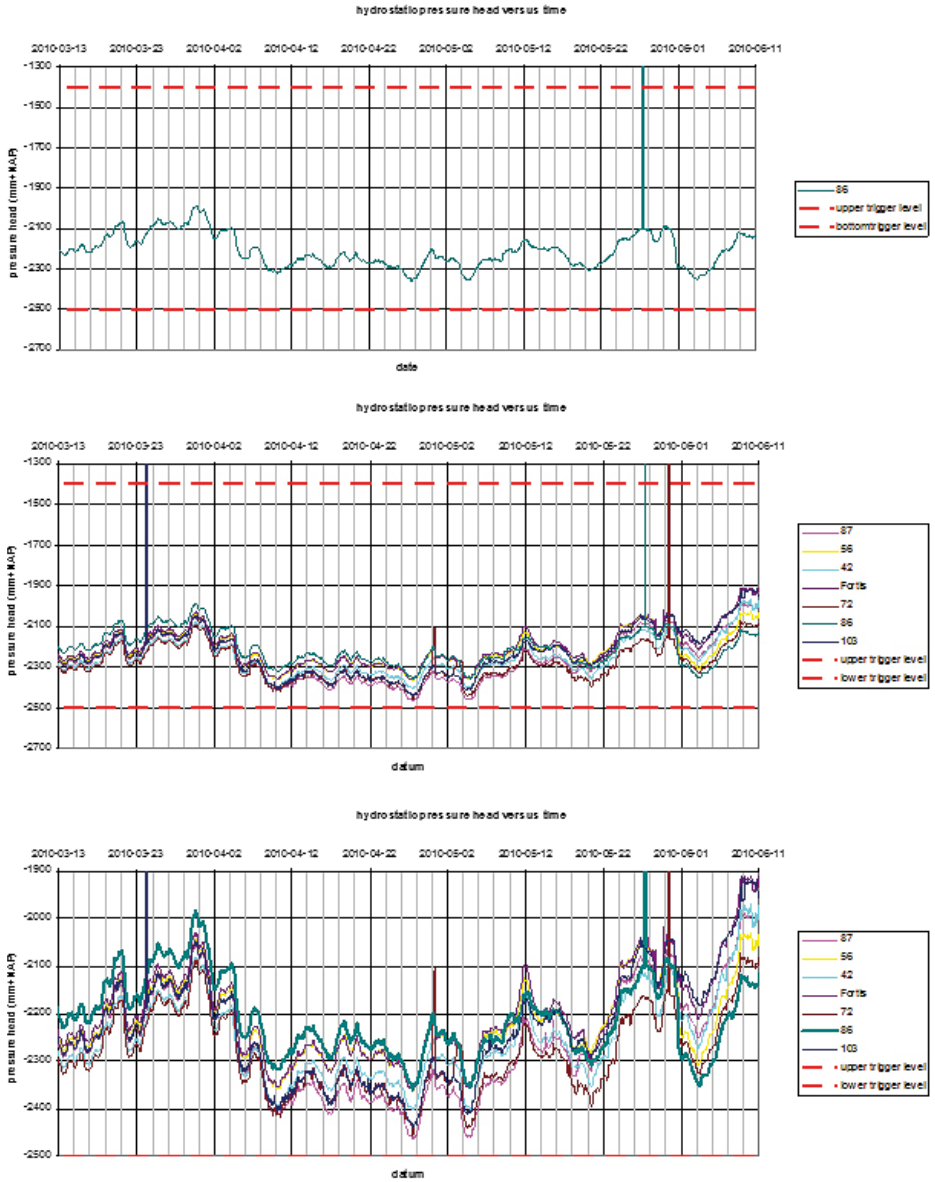
Uit de peilbuizen die in de verschillende aquifers zijn geïnstalleerd, is de lekkage wel eerder te zien dan in de gebouwmetingen, omdat deze gegevens elk uur werden geregistreerd. FIGUUR 4.9 toont de waterdrukwaarden (linker as) in de eerste en tweede zandlaag tijdens het eerste incident, en de handmatige metingen ter vergelijking met de opgetreden zakkingen van het nabijgelegen pand.



Figuur 4.9 / Groenlichtoverzicht voor bevriezen voegen en start ontgraven.

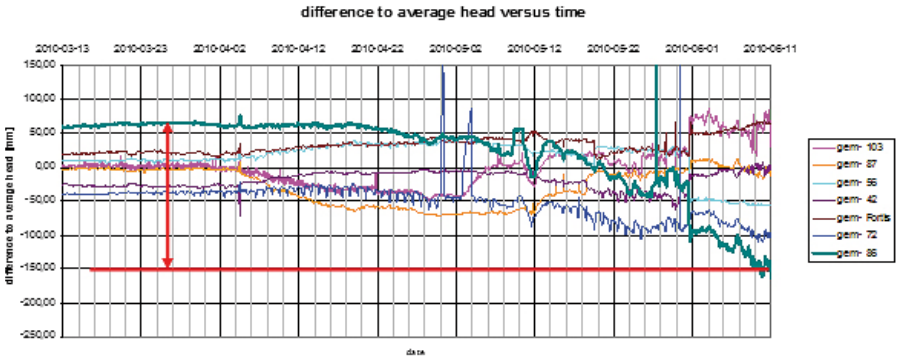
Nauwkeurige analyses van continu geregistreerde waterspanning kan wel kleinere lekkages in een vroeg stadium onthullen. Dit is afhankelijk van de doorlatendheid van aquifers buiten de ontgraving. Als een dergelijke nauwkeurige monitoring geen aanwijzing geeft voor lekkages, is niet gezegd dat deze er niet zijn.

Bij de nauwkeurige analyses is de natuurlijke fluctuatie in peilniveaus een complicerende factor om kleine lekken te kunnen identificeren. Met meerdere meetpunten kan een relatieve vergelijking gemaakt worden tussen de meetpunten om een beter inzicht te krijgen in de optredende lekkages. Dit is zichtbaar gemaakt met een voorbeeld in de FIGUUR 4.10. Wanneer peilbuis 86 los wordt beschouwd, lijkt de waterstand in deze peilbuis een normaal verloop te hebben en geen significante stijging of daling te ondergaan. Wanneer echter andere peilbuizen rond het station in dezelfde grafiek worden geplot, dan valt op dat de waterstand in peilbuis 86 van de hoogste stijghoogte (zoals gemeten in deze peilbuizen) daalt naar de laagste stijghoogte. Om hier beter en automatisch inzicht



Figuur 4.10 / Gemeten waterstanden in de verschillende peilbuizen.

in te krijgen, is in FIGUUR 4.11 steeds de afwijking van de waterstand in de verschillende peilbuizen weergegeven ten opzichte van de gemiddelde waterstanden in de peilbuizen. In die grafiek is te zien dat er eerst sprake is van een horizontale trend in alle peilbuizen, maar dat met name peilbuis 86 een daling inzet vanaf eind april 2010. Te zien is dat alle peilbuizen vanaf dat moment een daling dan wel stijging laten zien. Dat is niet vreemd aangezien het gemiddelde zelf ook wordt beïnvloedt. Door van zo'n grafiek gebruik te maken, bleek het in sommige gevallen zelfs mogelijk om vrij nauwkeurig (ordegrootte van meters) een locatie van de lekkage vast te stellen.



Figuur 4.11 / Afwijking van waterstanden in de verschillende peilbuizen ten opzichte van het gemiddelde.

Bovenal is gebleken dat bij zeer plotselinge lekkages observatie in de bouwkuip de snelste manier van identificatie van een incident is. Bij de vervolgwerkzaamheden na de twee incidenten is daarom niet meer uitgegaan van de metingen van de monitoring buiten de put, maar is vooral een goede instructie van de mensen in de put uitgangspunt geweest voor tijdige identificatie van mogelijke incidenten door lekkages in de diepwand. De monitoring buiten de put is uiteraard gehandhaafd om de omgevingsbeïnvloeding te kunnen volgen in de tijd, maar niet als middel om plotselinge incidenten te identificeren.

FIGUUR 4.12 toont het schema dat iedereen die in de stations werkte, na de incidenten van 2008, bij zich had. Dit schema is ontwikkeld om ervoor te zorgen dat er een risicobewustzijn aanwezig is bij de mensen in de stations, met een handelingsperspectief voor het geval zich een lekkage voordoet. Zo werden in principe dus de ogen van de mensen in de stations onderdeel van het monitoringssysteem. Ook betekende dit dat er al over maatregelen bij incidenten was nagedacht, vóórdat de incidenten zich voordoen. Materialen en materieel voor de maatregelen was aanwezig in de stations. Ook op momenten dat er niemand werkte, werd er periodiek een ronde gelopen door de stations. Met de organisatie van piketdiensten werd verzekerd dat in geval van nood altijd snel gereageerd kon worden.

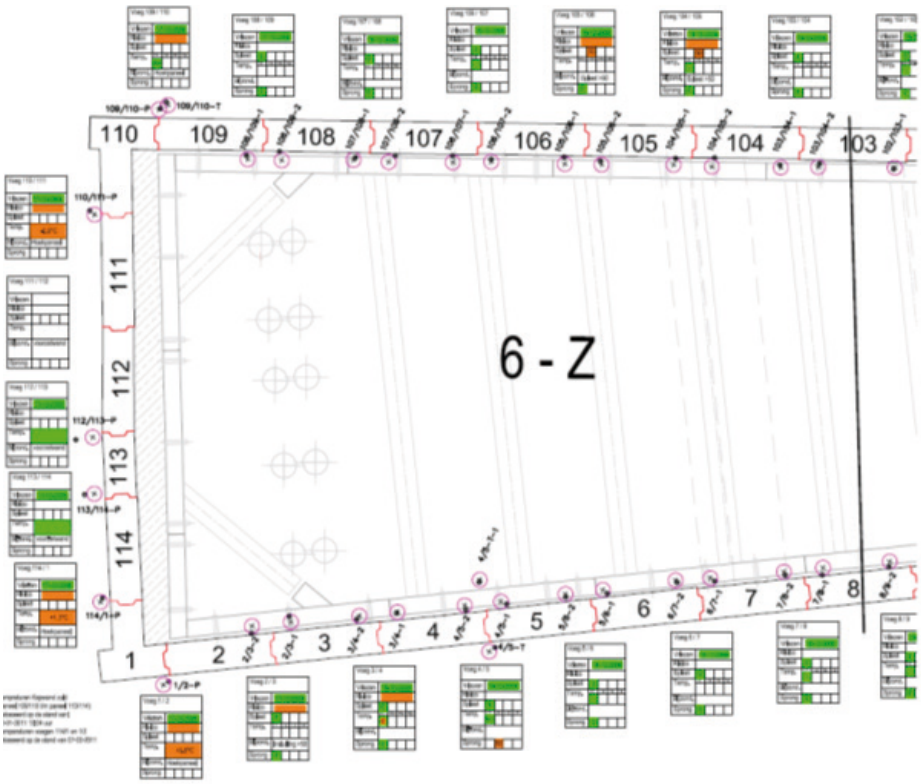
Lekkage:

Type	Definitie	Waarneming	1e maatregel	2e maatregel	Communicatie
A	Kleine lekkage, niet watervoerend	natte voegen <20mm, vochtpiekken, druppelend water	Monitoren	-	-
B	Kleine lekkage, niet watervoerend	natte voegen >20mm, vochtpiekken, druppelend water	stalen platen aanbrengen (§ 6.4.3.)	Indien lekkage optreedt na afdekken: met flexibele boor Ø12 mm aanboren en injecteren (§ 6.5.)	melding toezicht/HDT
C	Watervoerende lekkage, zonder uitspoeling grond	licht stromend water, geen uitspoeling van grond	met flexibele boor Ø12 mm aanboren en injecteren (§ 6.5.)		melding toezicht/HDT
D, E	Watervoerende lekkage, zonder uitspoeling grond	lopende waterultredingen, geen uitspoeling van grond	stalen platen aanbrengen (§ 6.4.3.)	Indien lekkage optreedt na afdekken: met flexibele boor Ø12 mm aanboren en injecteren (§ 6.5.)	Meldingsschema incidenten, niveau 2
F	Watervoerende lekkage, met lichte uitspoeling grond	stromend water, lichte uitspoeling grond	Toepassen kleikist	1. tegelijk met 1e maatregel: met flexibele boor Ø12 mm aanboren en injecteren (§ 6.5.)	Meldingsschema incidenten, niveau 4
				2 tegelijk met 1e maatregel: Injecteren buitenzijde diepwand in bestaande manchettebuis met PUR	
G, H	Grote lekkage met snelle uitspoeling grond	veel stromend water, snelle uitspoeling grond	Gronddam opwerpen	tegelijk met 1e maatregel: injecteren buitenzijde diepwand in bestaande manchettebuis met PUR	Meldingsschema incidenten, niveau 4

Figuur 4.12 / Maatregelenschema.

4.2.4 Monitoring vriesproces wanden en herstart ontgraven

Monitoring tijdens het vriezen van de diepwandvoegen is uitgevoerd om het vriesproces te controleren, om de eisen te controleren en om groen licht te geven voor de ontgraving. Dit proces is gevolgd met een overzicht zoals weergegeven in FIGUUR 4.13. De monitoring bestond uit vrieslansen en de peilbuismetingen. Op twaalf doorsnedes zijn verticale temperatuurlansen geplaatst op 1,2 meter afstand van de diepwandvoeg binnen de put en aan de buitenzijde van het station. Op deze twaalf locaties zijn bovendien een horizontale en een diagonale lans in de diepwand geplaatst om ook de temperatuurontwikkeling in de diepwand te kunnen meten. Met deze metingen kon de ontwikkeling van het vrieslichaam goed worden gevolgd. Zo kon globaal worden vastgesteld hoe de planning van de ontgraving kon voorlopen. Voordat echter goedkeuring werd gegeven voor een volgende ontgravingsslag werd een verticale temperatuurmeting gedaan in de grond binnen het station voor elke voeg op 20 centimeter afstand van de diepwand. Tot de ontgravingsdiepte werd elke 20 centimeter een meting gedaan. Alleen als alle metingen aan de gestelde eisen voldeden, werd toestemming gegeven. Het overzicht was een prettig hulpmiddel om een goed overzicht te krijgen van de toestand bij alle voegen.



Figuur 4.13 / Groenlichtoverzicht voor bevriezen voegen en start ontgraven.

In geval van twijfel over het vrieslichaam is op basis van de nauwkeurige analyse van de peilbuismetingen bepaald of de ontgraving kon doorgaan.

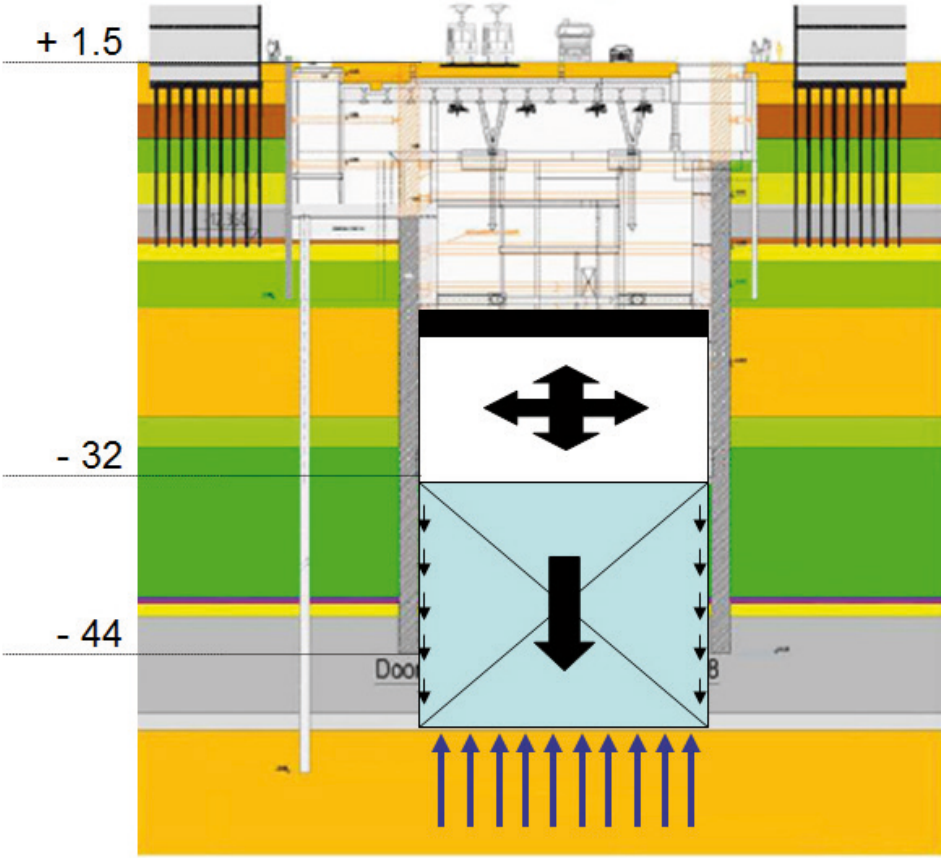
4.2.5 Monitoring ontgraven station Vijzelgracht tot het diepste niveau

Tijdens de diepste ontgraving van station Vijzelgracht was het opbarsten van de bouwputbodem het grootste risico. Er werden daardoor hoge eisen gesteld aan de ontwatering van het station en de toegepaste luchtdruk. Meer dan tien verschillende monitoringtechnieken zijn in samenhang toegepast om continu te controleren of er voldoende veiligheid tegen opbarsten aanwezig was. Alle metingen waren gerelateerd aan specifieke onderde-

len van het risico, en signaal- en interventiewaarden werden hierop ingesteld. Het proces rondom de monitoring was ook expliciet geregeld om ervoor te zorgen dat, indien nodig, tijdig vooraf vastgestelde maatregelen zouden kunnen worden genomen. Hieronder gaan we nader in op al deze aspecten.

Principe

In de derde zandlaag is een stijghoogte aanwezig van ongeveer NAP -2,5 meter. Er moet een krachtenevenwicht gevonden worden om opbarsten vanuit deze derde zandlaag te voorkomen. De neerwaartse krachten bestaan uit de volgende elementen (zie FIGUUR 4.14):



Figuur 4.14 / Principe van opbarsten en tegenwerkende krachten bij station Vijzelgracht.

- Het gewicht van de grond boven de derde zandlaag (weergegeven met de zwarte neerwaartse pijl in het blauw-grijze blok).
- De wrijving tussen de grond en de diepwand tot onderzijde diepwand en de wrijving tussen de grond aan de binnen- en buitenzijde van het station onder de onderkant van de diepwand (weergegeven met de kleine zwarte pijltjes). Om deze wrijving te vergroten, is een zo groot mogelijke bemaling toegepast in de tussenzandlaag op ongeveer NAP -42 meter. Deze bemaling was bewust groter (meer verlaging) dan noodzakelijk om opbarsten uit de tussenzandlaag zelf te voorkomen. Door deze bemaling worden de korrelspanningen namelijk groter en neemt de wrijving dus ook toe. Deze bemaling was noodzakelijk om veilig te kunnen ontgraven tot een niveau van ongeveer NAP -26 meter. Daarmee was de bemaling dus een kritisch onderdeel van het ontwerp. Bij falen van de gehele bemaling zou er sprake zijn geweest van opbarsten. De tussenzandlaag waarin de bemaling plaatsvond, was bovendien een dunne laag met fijn zand, waardoor er een risico bestond op verstopping van de filters.

- Vanaf NAP -26 meter was alleen een bemaling niet meer voldoende en moest luchtdruk worden toegepast (naast een blijvende passieve bemaling in de tussenzandlaag) om een extra neerwaartse kracht te genereren (weergegeven met het witte vierkant met pijlen in vier richtingen). Deze verhoogde luchtdruk werd gerealiseerd door een luchtdichte vloer (de zogeheten luchtdrukvloer) aan te brengen in het station. Op deze manier kon veilig verder ontgraven worden tot het eindniveau van ongeveer NAP -32 meter. Ook de luchtdrukinstallatie was een kritisch onderdeel van het ontwerp. Bij falen zou er sprake kunnen zijn van opbarsten.

Proces

Na de incidenten was de belangrijkste les dat monitoring weliswaar nuttig is, maar dat alleen meten niet voldoende is. Het is uitermate belangrijk om het monitoringproces zo in te richten dat de metingen ook nuttig zijn en dus tijdig gebruikt kunnen worden. Dat is een hele opgave, omdat er veel partijen en nog meer personen betrokken zijn bij de monitoring. Genoemd worden de projectleider opdrachtgever, toezichthouders, specialisten aan opdrachtgeverszijde, ontwerper, projectleider aannemer, projectleider onderaannemer(s), monitoringsaannemers, werkvoorbereider en hoofduitvoerder. Deze personen hebben allemaal verschillende belangen en ook de perceptie van risico's verschilt van persoon tot persoon.

Het bleek uitermate zinvol om periodiek bij elkaar te komen. In eerste instantie voor het ontwerp van de uitvoering. Door tijdens dit ontwerp ook de monitoring te bespreken, ontstaat een gedeeld beeld van nut en noodzaak van de monitoring in het kader van de beheersing van risico's. Dit ontwerpoverleg ging vervolgens in een vrijwel ongewijzigde samenstelling over in het monitoringsoverleg. Tijdens de uitvoering van de diepste ontgraving was er in kritieke fasen een wekelijks overleg waarbij alle genoemde partijen aanwezig waren. Hierdoor kenden personen elkaar ook persoonlijk en werd tussendoor – indien nodig – ook makkelijker direct contact met elkaar opgenomen.

Als voorbereiding op het genoemde overleg werd een statusrapport opgesteld waarin alle metingen in samenhang werden gepresenteerd. Dat was nodig, omdat veel verschillende partijen verantwoordelijk waren voor verschillende metingen. Dit document – dat steeds enkele tientallen bladzijden in beslag nam – bevatte alle tabellen en grafieken van de meetresultaten, inclusief een samenvatting waarin de meetresultaten werden vergeleken met verwachtingswaarden en alarmwaarden. Tijdens het overleg werd dit document besproken en naast de voortgang van de uitvoering gelegd. Dit laatste was van groot belang, omdat soms metingen in eerste instantie niet verklaard konden worden, terwijl de oorzaak dan lag in een iets gewijzigde planning van de uitvoering.

Daarnaast werd het overleg vaak gebruikt om wensen vanuit de uitvoering over een gewijzigde fasering met elkaar te bespreken. Vaak bleek dat met behulp van de uitgebreide monitoring een gewijzigde fasering veilig en goed onderbouwd goedgekeurd kon worden.

Ten slotte bleek het overleg ook nuttig om draagvlak te krijgen voor de monitoring die soms ook lastig is voor de uitvoering. Peilbuizen en tell tales in de put zijn bijvoorbeeld kwetsbaar tijdens de uitvoering, maar wel noodzakelijk voor een goede risicobeheersing. Doordat de uitvoerder ook bij het overleg aanwezig was, ontstond hiervoor meer begrip.

Techniek

Om vast te stellen welke monitoring noodzakelijk was, is eerst een risicoanalyse gemaakt. Als belangrijkste risico's zijn geïdentificeerd:

- Opbarsten van de bouwkuipbodem.
  - Uitval bemaling tussenzandlaag.
    - … Verstopping onttrekkingsbronnen.
    - … Uitval van de bemaling zelf.
    - … Uitval van een bron.
    - … Groot lek in de diepwand ter plaatse van de tussenzandlaag.

  - Uitval luchtdruk.
  - Stijghoogte derde zandlaag hoger dan verwacht.
  - Sterkte grond lager dan verwacht.
- Bezwijken van de luchtdrukvloer.
- Lekkage diepwand.
- Bezwijken van de diepwand.
  - Uitval van een of meerdere stempels.
  - Bezwijken van het groutstempel.
- Welvorming vanuit de derde zandlaag.
- Opdrijven van de totale constructie.

Voor al deze risico's en oorzaken is vervolgens vastgesteld:
- Welke monitoring geschikt is om het risico te volgen in de tijd.
- Hoe het risico met de monitoring gesignaleerd kan worden.
- Welke maatregelen genomen moeten worden als het risico zich voordoet (of dreigt voor te doen).

Op deze manier is een monitoringplan opgesteld waarin per instrument/type meting het volgende was vastgelegd:
- Locatie.
- Frequentie.
- Verantwoordelijke voor uitvoering metingen.
- Alarmwaarden.
- Communicatie van resultaten.

De uiteindelijke monitoring heeft bestaan uit:
- Metingen van de bewegingen van panden in de omgeving met RTS'en.
- Waterstanden in verschillende zandlagen, binnen en buiten het station met peilbuizen.
- Waterdrukken in kleilagen met BAT-sensoren.
- Horizontale verplaatsingen van de diepwand met handmatige inclinometers in de diepwand, inclusief handmatige metingen van de kopverplaatsing van de inclinometers.
- Horizontale verplaatsingen van de grond buiten het station met automatische inclinometers.
- Verticale verplaatsingen van het groutstempel met tell tales.
- Stempelkrachten met rekstrookjes.
- Debieten van de bemaling.
- Luchtdruk tijdens luchtdrukfase.
- Luchtverlies tijdens luchtdrukfase (benodigd debiet om de luchtdruk op peil te houden).

Het is lastig om aan te geven welke monitoring uiteindelijk het meest nuttig is gebleken. Het is juist de combinatie van alle metingen die maakt dat het gedrag van het station goed kon worden beschouwd en beoordeeld. Het is daarom erg nuttig gebleken om niet alleen binnen één type meting metingen in duplo uit te voeren, maar om ook te zoeken naar verschillende typen metingen die op verschillende manieren het gedrag van de bouwkuip meten. Bijvoorbeeld dicht bij de bron van mogelijk falen (rekken in stempels, waterstanden in het station, debieten bemaling, uitbuiging diepwand) tot verder van de bron af (waterstanden buiten het station, horizontale verplaatsingen van de grond) tot het uiteindelijke gevolg, zijnde de mogelijke schade aan belendingen (verplaatsingen van de belendingen).

Wel kan vastgesteld worden welke typen metingen voor weinig discussie over de interpretatie zorgen. Dit zijn over het algemeen de prismametingen van de panden, waterstanden en de luchtdrukgegevens. Inclinometers geven altijd wel enige aanleiding tot discussie over de juistheid van de metingen, met name bij de automatische meters. De

bovenkant van de inclinometers in de diepwand moeten bij elke inclinometing ingemeten worden om de absolute verplaatsingen te kunnen bepalen; de teen van de diepwand is immers juist aan vervorming onderhevig en kan niet gehanteerd worden als vast punt. De absolute rekmetingen op de stempels gaven ook altijd aanleiding voor discussie en konden eigenlijk alleen relatief worden gebruikt (aangeven of er sprake is van een stijging van krachten).

4.2.6 Monitoring laatste ontgravingsslag station Rokin

Anders dan bij station Vijzelgracht was bij station Rokin geen bemaling of luchtdruk nodig om te komen tot een krachtenevenwicht met de waterdruk in de derde zandlaag (zie voor een doorsnede FIGUUR 4.15). Dit kwam voornamelijk doordat het station minder diep is en 'slechts' tot NAP -26 meter ontgraven hoefde te worden. Het gewicht van de kleilagen onder ontgravingsniveau was voldoende om een krachtenevenwicht te bereiken.

Het faalmechanisme 'grondbreuk' speelde wel een rol bij station Rokin. Alleen door aan het groutstempel onder ontgravingsniveau sterkte te ontlenen, kon een voldoende veilige situatie worden berekend. Tegelijkertijd was de sterkte van het groutstempel een onzekere factor. Daarom werd besloten om een monitoringprogramma op te zetten specifiek gericht op dit faalmechanisme. Als de sterkte van het groutstempel zou tegenvallen en grondbreuk zich daardoor zou voordoen, dan zou hierdoor de bouwputbodem (en dus ook het groutstempel) omhoog komen en de teen van de diepwanden naar binnen bewegen. Ook zouden de waterspanningen in de kleilaag onder ontgravingsniveau plotseling toenemen als heave (hydraulische grondbreuk) zich voordoet. Door specifiek voor dit risico te bepalen welke mechanismen er kunnen optreden, kon heel gericht monitoring worden ingericht. Besloten werd om dagelijks (ook in de weekenden) de inclinometers in de diepwanden, de tell tales in het groutstempel en de waterdrukken in de kleilagen te meten en te analyseren.

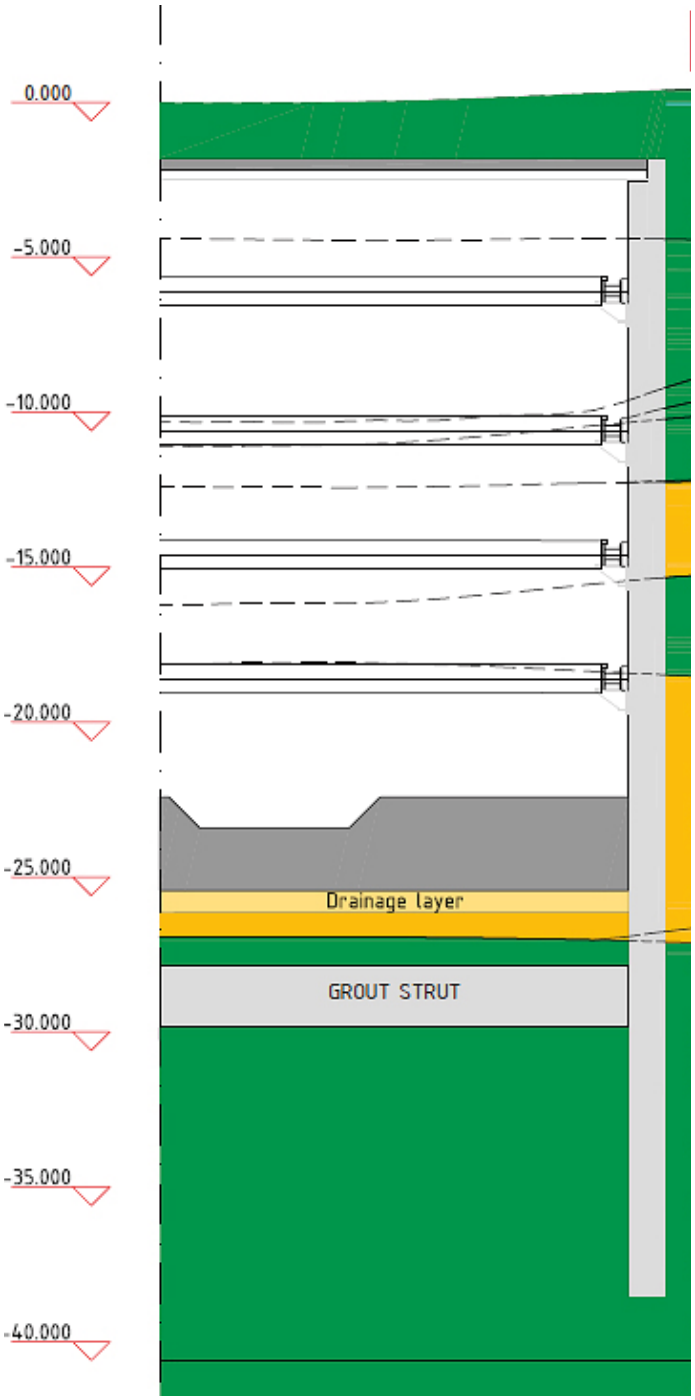
De ontgraving verliep vervolgens voorspoedig, maar na bereiken van het diepste punt van de ontgraving en na aanbrengen van een drainagelaag met daarboven een werkvloer, ontstond plotseling een wel in de bouwputbodem. Conform vooraf opgestelde plannen wist men in het station direct welke maatregelen genomen moesten worden. Zo werd een grindkoffer met geotextiel aangebracht om grondtransport tegen te gaan en de waterstroming in stand te houden, zodat geen waterdrukken werden opgebouwd. Ook werden direct de monitoringresultaten nader bekeken. Er was op alle metingen niets te zien dat op een faalmechanisme duidde. Maar natuurlijk ontstond er wel twijfel over de veiligheid van de situatie. Hoe moest er verder worden gegaan? Er werd in een multidisciplinair team vanuit zowel opdrachtgever, aannemer, ontwerp en kennisinstituut gewerkt aan een oplossing, volgens een risicogestuurde aanpak.

Allereerst kwam de vraag op tafel wat de herkomst van het water in de wel was. De volgende drie scenario's voor de herkomst van het water waren geïdentificeerd:

1. Lek door een scheur in de Eemklei.
2. Kwel door de Eemklei (geen scheur).
3. Lekkage vanuit de tweede zandlaag, door de diepwand heen, onder de werkvloer door naar de wel.

Mogelijke gevolgen zouden zijn:

A. Door waterdrukken onder het groutstempel kon het groutstempel opbarsten. Dit zou hebben geleid tot grote vervormingen van de gehele put, en waarschijnlijk uiteindelijk instabiliteit van de hele put.
B. De waterspanningen in de Eemklei konden stijgen, waardoor korrelspanningen lager werden. Dit kon leiden tot passief bezwijken van de diepwand, verlies van verticaal evenwicht en/of grondbreuk.



Figuur 4.15 / Schematische weergave doorsnede station Rokin.

C. Piping vanuit de derde zandlaag, waardoor instabiliteit van de put kon ontstaan.
D. Piping vanuit de tweede zandlaag, waardoor verzakkingen in de omgeving konden ontstaan.
E. Een dusdanige toestroming van water dat het water niet meer weggepompt kon worden en de put vol water zou komen te staan.
F. De drainagelaag kon verstopt raken en zou daardoor niet voldoende werkzaam kunnen zijn voor de benodigde periode van ongeveer twee jaar.

De scenario's voor herkomst van het water hebben verschillende van de beschreven gevolgen. In TABEL 4.1 is dat met kruisjes weergegeven.

Tabel 4.1 / Herkomst water bij drie scenario's

	A	B	C	D	E	F
1) Scheur	x	x	x		x	x
2) Kwel	x	x				x
3) Tweede zandlaag	x			x	x	x

Duidelijk werd dat de bestaande monitoring niet voldoende was om inzicht te krijgen in de situatie. Daarom werd besloten om de monitoring te intensiveren met de volgende twee doelen:

1. Bepalen welk scenario of welke scenario's er spelen.
2. Bepalen of er nog steeds sprake is van een stabiele situatie, dan wel of de situatie verbetert of verslechtert.

Voor de verschillende risico's was het nodig om verschillende parameters te meten. Deze parameters waren:

i. Waterdruk in de Eemklei en glaciale klei.
ii. Waterdruk onder het groutstempel.
iii. Buiging van de diepwand onder het ontgravingsniveau.
iv. Doorbuiging van het groutstempel ten opzichte van de diepwand.
v. Zakken/rijzen van de diepwand.
vi. Stijghoogte in de derde zandlaag.
vii. Stijghoogte in de tweede zandlaag (buiten de put).
viii. Debiet van de wellen.
ix. Doorbuiging/hoogte van de aangebrachte werkvloer.
x. Verplaatsingen panden in omgeving.

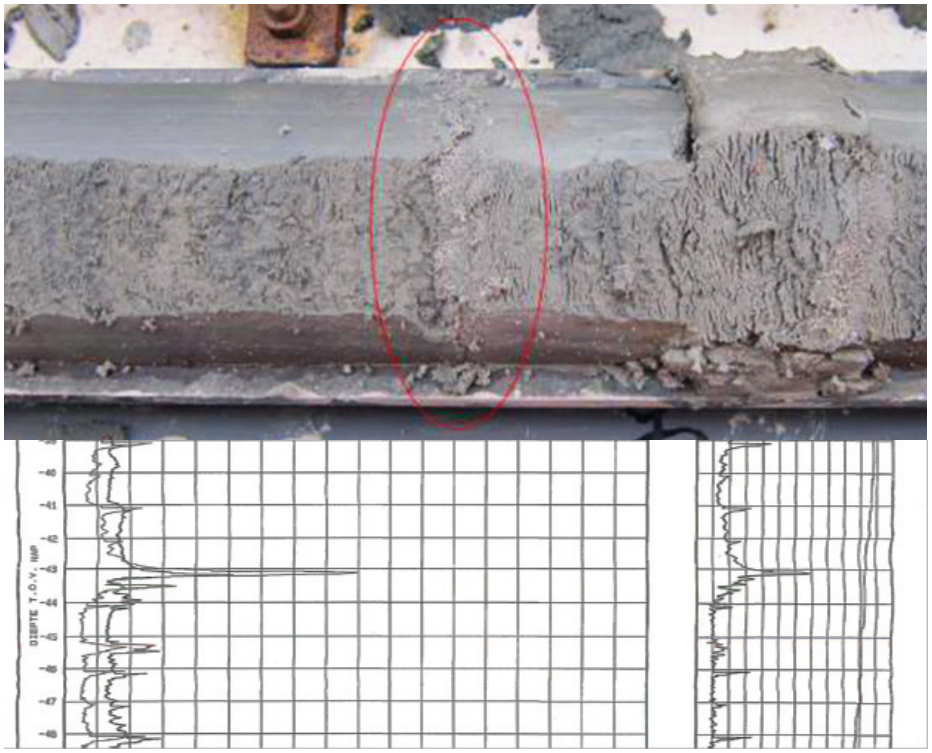
In TABEL 4.2 staat aangegeven welke metingen van de hiervoor beschreven parameters van belang waren voor de verschillende risico's.

Tabel 4.2 / Metingen die van belang zijn voor de scenario's

	i	ii	iii	iv	v	vi	vii	viii	ix	x
1A		x		x	x	x				
1B	x		x	x	x	x				
1C					x			x	x	
1E								x		
1F										
2A		x		x	x					
2B	x		x	x	x	x				
2F										
3A		x		x	x		x			
3D							x	x	x	x
3E								x		
3F										

Naast monitoring werd ook aanvullend grondonderzoek uitgevoerd om beter zicht te krijgen op de oorzaak van de wel. Daartoe werden waterkwaliteitsmetingen uitgevoerd van het water uit de wel en uit de derde en tweede zandlaag. Omdat de chemische samenstelling van het grondwater in beide zandlagen verschilt, kon zo de herkomst van het water uit de wel worden bepaald. Helaas leverde dit geen bruikbare resultaten op, waarschijnlijk doordat het water uit de wel al van chemische samenstelling was veranderd door contact met andere grondlagen en/of de drainagelaag onder de werkvloer.

Naast de waterkwaliteit werden aanvullende sonderingen en boringen uitgevoerd. De sonderingen werden uitgevoerd vanaf de werkvloer. De boringen werden uitgevoerd aan de buitenzijde van het station, omdat een boring in het station praktisch gezien niet haalbaar was door het risico van een wel door het boorgat. De boringen gaven een belangrijk inzicht in de situatie. Aangetoond werd namelijk dat er op een diepte van ongeveer NAP -44 meter een dunne zandlaag van 2 centimeter dik aanwezig was (zie de uitsnede van een sondering en een foto van de boring in FIGUUR 4.16).

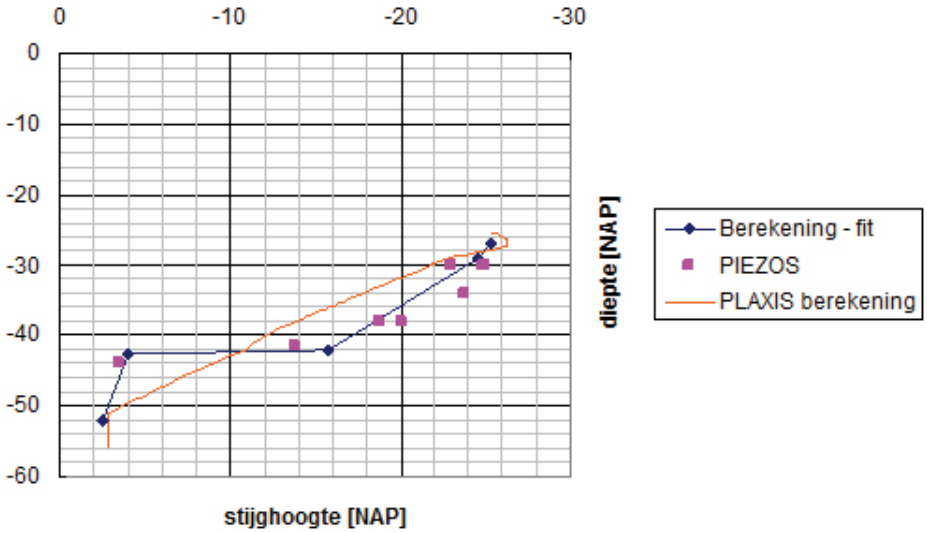


Figuur 4.16 / Identificatie van dunne zandlaag op NAP -44 meter.

Toen ook de meetresultaten van de waterspanningsmeters in de kleilagen binnenkwamen, werd duidelijk dat in deze dunne zandlaag een veel hogere waterdruk aanwezig was dan gedacht. Aangenomen werd namelijk dat er een hydrostatisch verloop van de waterspanningen zou zijn in de kleilagen, maar nu bleek er een duidelijke sprong in de waterspanningen te zijn als gevolg van een hoge weerstand in de veenlaag tussen Eemklei en glaciale klei (zie FIGUUR 4.17).

Deze 'ontdekking' had grote gevolgen. Er kon namelijk geen verticaal evenwicht worden berekend vanaf een diepte van NAP -44 meter. Toch wezen de resultaten van het uitgebreide monitoringprogramma niet op het optreden van verlies van verticaal evenwicht. Daarom werd besloten om verder te werken met behulp van de observational method (deze term werd eerder tijdens het project niet gebruikt). Met een '*falling head*'-proef werd de doorlatendheid van de dunne zandlaag vastgesteld, waarna berekend werd dat bij een opbarstsituatie pas na achtenveertig uur voldoende water toegestroomd kon zijn door de zandlaag om 5 centimeter rijzing te veroorzaken. Daarbij werd 5 centimeter als maximaal toelaatbare verplaatsing ingeschat.

Op basis hiervan werd een tijdsvenster van achtenveertig uur gehanteerd. Als metingen zouden aangeven dat er sprake was van verlies van verticaal evenwicht, dan moest er



Figuur 4.17 / Verwacht verloop van de waterspanning (Plaxis, oranje lijn) en gemeten waterspanningen met bijbehorende fit (roze vierkantjes en blauwe lijn).

binnen achtenveertig uur voldoende grond in het station aangebracht zijn om tegendruk te kunnen bieden tegen de grondwaterdruk. Dat betekende in de praktijk dat 1250 kubieke meter grond naar hartje Amsterdam gebracht moest worden. Bovendien was het kerstperiode en was de aannemer in principe niet meer met volledige mankracht aanwezig in het station.

Er werd besloten om tijdens de kerstperiode twee keer per dag alle monitoringsresultaten te analyseren. Er werd een organisatie opgezet waarmee werd verzekerd dat vanaf 'start-optreden-faalmechanisme-opbarsten' er binnen achtenveertig uur voldoende grond in het station zou liggen. Hierbij werden de volgende fasen onderscheiden, met daarbij duidelijke afspraken over welke personen betrokken moesten worden en hoe te communiceren:

- Monitoring/bewaking. Hier was achttien uur voor nodig, met de conservatieve aanname dat precies na de laatste meting het proces van opbarsten zou beginnen.
- Beoordelen. Dit betrof de technische beoordeling van de meetresultaten en indien nodig bijeenroepen van het team. De teamleden stonden paraat tijdens deze periode om indien nodig direct te komen. Hier werd maximaal vijf uur benodigde tijd voor ingeschat.
- Besluitvorming/beoordelen. Indien de meetresultaten daar aanleiding toe zouden geven, werd een tweede team bijeengeroepen met beslissingsbevoegden en topspecialisten. Tot moment van besluitvorming door dit team werd een maximaal benodigde tijd ingeschat van maximaal twaalf uur.
- Uitvoering. Een gronddepot en transporteur stonden stand-by en in geval het nodig was, kon binnen veertien uur de 1250 kubieke meter grond zijn aangebracht in het station.

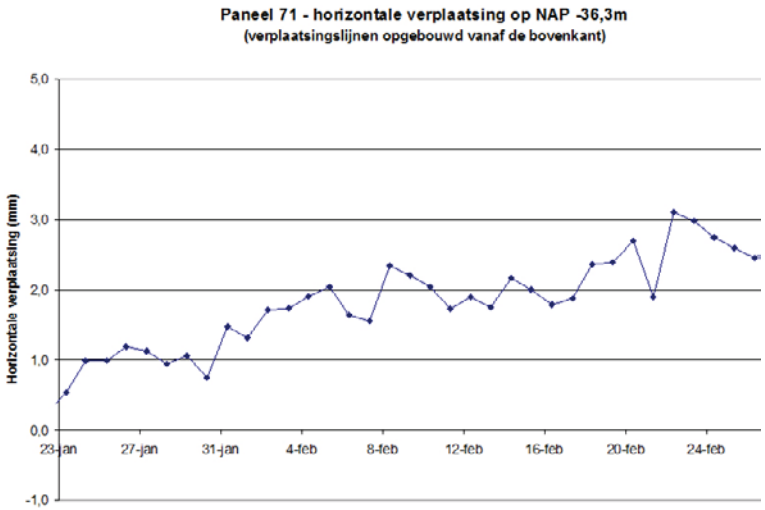
Uit bovenstaande blijkt dat alleen een technische opzet van de monitoring onvoldoende is. Het is uitermate belangrijk om juist ook het proces en de organisatie rond de monitoring op orde te hebben. Alleen dan kan monitoring gebruikt worden om de risico's bij een bouwproject te beheersen.

Als extra borg tegen opbarsten, werd tijdens de kerstperiode nog een aanvullende bovenbelasting aangebracht door middel van met water gevulde zwembadjes (zie FIGUUR 4.18). Deze zwembadjes waren duidelijk zichtbaar vanaf het uitkijkplatform dat aanwezig was in station Rokin voor geïnteresseerd publiek. In plaats van dit uitkijkplatform te sluiten, werd besloten dit open te houden en openhartig te communiceren over de situatie ter plaatse. Hieruit werd (wederom) geleerd dat het beter is om open te communiceren met een goed verhaal, dan om de risico's binnen het team te houden.

Figuur 4.18 / Aanvullende bovenbelasting in de vorm van zwembadjes.

Na de kerstperiode is tijdens de verdere werkzaamheden (ontgraving in andere delen van het station) de monitoring in stand gehouden en werden de belangrijkste metingen elk uur gecontroleerd.

Tijdens de monitoringsperiode bleek dat alle monitoring zeer bruikbaar was. Er was vrijwel geen discussie over interpretatie en bruikbaarheid van de meetresultaten. Specifiek worden daarbij ook de handmatige inclinometers in de diepwanden genoemd. Waar elders in dit document vaak twijfels worden geuit bij de praktische bruikbaarheid van dit instrument (in geval van automatische metingen) bleken de handmatige inclinometers tijdens de hierboven beschreven situatie goed bruikbaar. Wellicht komt dit door de korte tijdsperiode van meten. Een bruikbare weergave van de meetresultaten was de uitbuiging van de diepwand in de tijd weergegeven voor een bepaalde diepte, zie als voorbeeld FIGUUR 4.19.



Figuur 4.19 / Uitbuiging van de diepwand.

Geconcludeerd wordt dat monitoring uitermate geschikt is om in noodsituaties aan te tonen dat de situatie veilig is, zolang is aangetoond dat:

- metingen inderdaad inzicht geven in het risico waarvoor ze bedoeld zijn;
- meetresultaten tijdig beschikbaar zijn, in een goede organisatie worden beoordeeld en waarmee besluiten genomen kunnen worden;
- maatregelen tijdig genomen kunnen worden.

Daarmee is het dus noodzakelijk dat naast een goed meetplan ook de organisatie goed is neergezet.

4.3 Conclusies en geleerde lessen

Monitoring vraagt om een systematische en strategische aanpak. Wat, wanneer, waar en hoe frequent metingen worden uitgevoerd, hangt af van een risicogebaseerde aanpak en inzicht in de geotechnische faalmechanismen. Monitoring kan plotselinge, brosse faalmechanismen zoals lekkages en doorbraken niet voorkomen. 'Wat als'-scenario's zijn essentieel voor adequaat risicomanagement. Activiteiten en hulpmiddelen om het risicobewustzijn bij de mensen in de bouwput te vergroten, hebben een groot positief effect op de totale risicobeheersing. Deze mensen zorgen voor directe observaties, die in geval van incidenten vaak sneller werken dan welk systeem dan ook.

Automatische metingen hebben als voordeel dat ze een vrijwel continu beeld van de effecten van de bouw geven. Nadeel is dat er op die manier zeer veel data beschikbaar komen met een niet-gegarandeerde voldoende kwaliteit. Met name de automatische extenso- en inclinometers worden hierbij genoemd. Hierdoor neemt de benodigde inspanning voor een goede analyse enorm toe. Met kwalitatief goede data valt beter te sturen dan met alleen grote hoeveelheden. Daarnaast is een database met gebruiksvriendelijke userinterface essentieel voor het analyseren van de monitoringdata.

Een robuust systeem met veel verschillende soorten metingen, maakt onderling vergelijken mogelijk, zodat meer betrouwbaarheid wordt verkregen. Het is dus nuttig om veel verschillende typen metingen te hebben. De verschillende metingen vergroten namelijk het inzicht in de situatie en kunnen helpen om afwijkende meetresultaten te verklaren. Tegelijkertijd is het echter ook zo dat met een toenemende hoeveelheid metingen en data er ook een toenemende kans op ruis is, waardoor discussies kunnen ontstaan.

Het is daarom van cruciaal belang om regelmatig bij elkaar te komen met alle betrokken partijen (projectleider opdrachtgever, toezichthouder, specialist aan opdrachtgeverszijde, ontwerper, projectleider aannemer, monitoringsaannemers, werkvoorbereider, uitvoerder). Alleen op die manier kunnen monitoringsresultaten goed naast de voortgang van het werk worden gelegd en worden besproken met elkaar. Het zorgt bovendien voor wederzijds vertrouwen en begrip, waardoor monitoring een gewaardeerd instrument wordt om go/no-gobeslissingen te kunnen nemen. Het werkt daarbij goed als er één persoon/partij voor elke vergadering een goed overzicht van alle data beschikbaar stelt en ervoor zorgt dat bij ontbrekende en afwijkende gegevens al voor de vergadering navraag gedaan wordt naar mogelijke oorzaken daarvan.

Nauwkeurige analyse van continue registratie van de waterspanning kan een lekkage snel zichtbaar maken. Dit is afhankelijk van waterstroming en doorlatendheid van aquifers buiten de ontgraving. Hoe kleiner de doorlatendheid, hoe minder goed met peilbuismonitoring een lekkage is vast te stellen. Als de peilbuizen geen lekkage aangeven, is het niet gezegd dat deze er niet is; andersom is het wel zo dat als er een lekkage is, deze in de metingen te zien zal zijn.

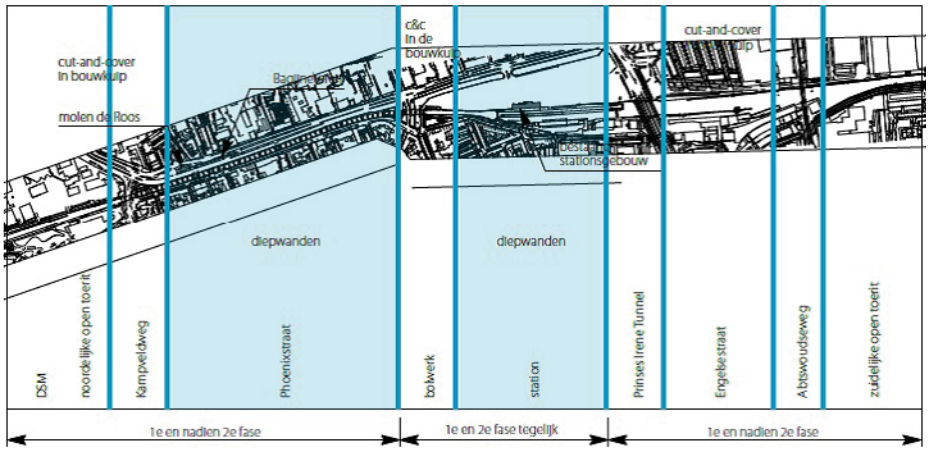
De resultaten van de monitoring zijn tevens gebruikt voor communicatie naar de omwonenden. Hierbij hoort een goede toelichting en uitgebreider overleg met mensen die vragen hebben.

5 Spoorzone Delft

5.1 Inleiding

5.1.1 Projectbeschrijving

In het project Spoorzone Delft wordt het uit 1960 daterende tweesporige viaduct vervangen door een 2,3 kilometer lange tunnel. De tunnelconstructie biedt plaats aan vier sporen, waarvan er twee volledig ingericht worden voor exploitatie, en de overige twee pas in een later stadium worden ingericht. Naast de aanleg van de viersporige tunnel omvat het project ook de aanleg van een ondergronds station, een circa 600 meter lange dubbellaagse ondergrondse parkeergarage en de herinrichting van de openbare ruimte op maaiveldniveau.



Figuur 5.1 / Fasering en technieken Spoorzone Delft.

Een gefaseerde uitvoering maakt het mogelijk het treinverkeer vrijwel continu (op één week na) doorgang te verlenen. Daartoe werd eerst de oostelijke buis, met ruimte voor twee sporen, afgebouwd (de eerste fase). Vervolgens werden deze aangesloten op het bestaande spoor en werden de treinen door de nieuwe tunnelbuis geleid. Het bestaande spoorviaduct kon vervolgens worden gesloopt, waarna de westelijke tunnelbuis en de parkeergarage aangelegd konden worden (de tweede fase).

In de zones waar het bestaande spoor – hetzij op het viaduct, hetzij op een grondlichaam – voldoende ver was verwijderd van de te realiseren westbuis, werden west- en oostbuis tegelijkertijd tijdens de eerste fase gerealiseerd.

De verschillende bouwmethoden die in het project werden toegepast, zijn gedicteerd door de contractueel gestelde eisen aangaande de beïnvloeding van de aanpalende gebouwen. In die delen waar de nabijgelegen bebouwing ofwel voldoende ver van de bouwput lag, ofwel het meer recente gebouwen betrof met betonconstructies gefundeerd op palen, werd een traditionele cut-and-covermethode met uitvoering van het definitieve betonwerk binnen tijdelijke bouwkuipen voorzien. In het gedeelte Phoenixstraat, waar zich op staal gefundeerde gebouwen op nauwelijks 3 meter afstand van de te realiseren tunnel bevonden, werd de top-downbouwmethode met diepwanden toegepast, waarbij de diepwanden zowel in tijdelijke als definitieve fase dienst doen als grond- en waterkerende constructies.

Ook het nieuwe ondergrondse station werd uitgevoerd in een top-downsequentie met diepwanden. Dit was enerzijds vanwege de nabijheid van het monumentale bestaande stationsgebouw, maar vooral vanwege het feit dat het ondergrondse station ook als fundatie moest functioneren voor het nieuw te bouwen stadskantoor. Door toepassing van diepwanden als grond- en waterkerende constructies kon tevens met dezelfde diepwanden voldoende verticale draagkracht voor het stadskantoor geleverd worden.

Vanuit opdrachtgever werd geëist dat gedurende de realisatiefase van het project:
- er geen ontoelaatbare schade zou optreden aan de belendende structuren;
- er geen ontregeling zou zijn van het spoor- en tramverkeer ten gevolge van te grote deformaties van de rails;
- er geen ontoelaatbare wijzigingen zouden ontstaan in de bestaande geohydrologische situatie wat betreft waterstanden en stijghoogtes, scheiding van bestaande watertafels en de aanwezige grondwaterstroming.

Voor de opvolging en validatie van elk van deze drie hoofdonderwerpen was een accurate monitoring vereist.

5.1.2 Beheersing deformaties gebouwen

Settlement risk management (beheersing van zettingsrisico's)
Het *settlement risk management* (SRM) omvat alle activiteiten die gewijd zijn aan de beheersing van de risico's op bouwschade aan belendingen, die door zettingen worden veroorzaakt in zowel de ontwerp- als uitvoeringsfase.

De activiteiten in de ontwerpfase waren:
- *Settlement risk assessment* (SRA), de beoordeling van zettingsrisico's van belendingen op basis van een gekozen uitvoeringsmethode.
- Implementatie van mitigerende maatregelen in het ontwerp op plaatsen waar het risico onaanvaardbaar groot lijkt te worden.

De activiteiten in uitvoeringsfase zijn:
- Monitoring van verplaatsingen van belendingen, voor, tijdens en na de zettingveroorzakende bouwwerkzaamheden.
- Implementatie van mitigerende maatregelen in de uitvoering op plaatsen waar het risico onaanvaardbaar groot lijkt te worden.

Settlement risk assessment (beoordeling van zettingsrisico's)
Het hoofddoel van de SRA is de beoordeling van het risico op bouwschade aan belendingen, die door zettingen van de ondergrond veroorzaakt wordt, om vervolgens de invloed van de bouwwerkzaamheden op de belendingen zo veel mogelijk ontwerpmatig te minimaliseren. In het geval van Spoorzone Delft zouden de meeste maaiveldzettingen ontstaan als gevolg van de installatie van de bouwput of tunnelwanden, en door het ontgraven van de bouwputten.

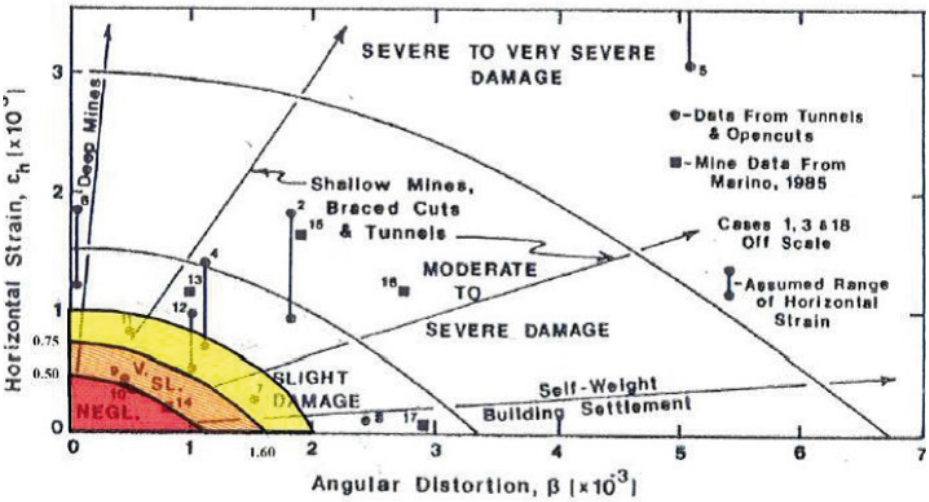
Aangenomen werd dat alle gebouwen die zich volledig of gedeeltelijk binnen de zone bevinden waarin de berekende zettingen meer dan 1 millimeter bedragen, in de SRA opgenomen moesten zijn. Buiten deze contour werd verondersteld dat er geen schade zou optreden omdat de zettingen dan te klein zijn.

Afhankelijk van de staat van de gebouwen bij aanvang van de werkzaamheden, en de verwachte vervormingen tijdens de zettingveroorzakende bouwwerkzaamheden, was de aanpak erop gericht om elk gebouw in een bepaalde schaderisicoklasse in te delen. In BIJLAGE A.1 wordt nader uitgelegd hoe de SRA in verschillende opeenvolgende stappen tot stand gekomen is.

Taakstelling met betrekking tot deformaties gebouwen
Op basis van de SRA in fasen 1 en 2 werd de volgende taakstelling aan de opdrachtnemer gegeven:

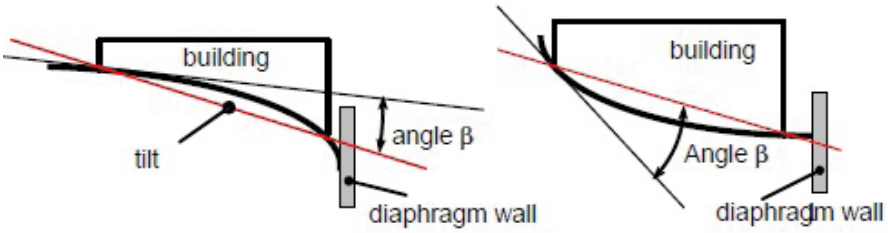
> *Alle belendingen binnen het invloedsgebied van de werkzaamheden (dit is het gebied binnen de zettinsgcontour van 1 millimeter), wordt een niveau van toelaatbare bijkomende schade toegekend. Voor 'rode' gebouwen is de toelaatbare bijkomende schade verwaarloosbaar (negligible), voor 'oranje' gebouwen is de toelaatbare bijkomende schade zeer gering (very slight) en voor de 'gele' gebouwen kon een geringe (slight) bijkomende schade toegelaten worden.*

De hieraan gerelateerde vervormingscriteria zijn de relatieve hoekverdraaiing ß en de horizontale rek ε_h, met gecombineerde grenswaarden per gebouwklasse (kleur) zoals aangegeven in FIGUUR 5.2, gebaseerd op het onderzoek van Boscardin en Cording. Het dient opgemerkt te worden dat de opdrachtgever de gangbare grenslijnen tussen de verschillende gebieden aangescherpt had. Zo was het gele gebied meer dan gehalveerd ten opzichte van de originele grafiek van Boscardin en Cording.



Figuur 5.2 / Vervormingscriteria per gebouwklasse.

Hierbij wordt de relatieve hoekverdraaiing β als volgt bepaald:



Figuur 5.3 / Relatieve hoekverdraaiing.

Deze schadeniveaus zijn bedoeld als eisen aan de aannemer. Dat wil zeggen dat de aannemer de tunnelconstructie dusdanig dient te ontwerpen, dat de combinatie van relatieve rotatie en horizontale rek voor elk gebouw binnen het voor dat gebouw toelaatbare gebied dient te vallen. De maatregelen om aan deze eisen te voldoen zijn ter keuze van de aannemer.

5.1.3 Beheersing deformaties trein- en tramsporen

Vanuit de opdrachtgever werd vereist dat het bestaande treinspoor (het spoor op het viaduct en de grondlichamen tijdens de eerste fase en het spoor in de oostbuis tijdens de tweede fase) steeds voldeed aan de eisen zoals gesteld in het document OHD00022 *Onderhoudsdocument, instandshoudingsspecificaties spoorgeometrie*. Deze eisen zijn weergegeven in FIGUUR 5.4.

Meting	Signaalwaarde GW x 0.70	Interventiewaarde GW x 0.90	Grenswaarde GW x 1.0
Schift spoor	+/-7mm	+/- 9mm	+/-10mm
Verkanting spoor	+/-14mm	+/- 19mm	+/-20mm
Scheluwte spoor	+/-14mm	+/- 19mm	+/-20mm

Figuur 5.4 / Instandshoudingsspecificaties spoorgeometrie.

FIGUUR 5.5 toont de criteria die volgden vanuit de richtlijnen van de Haagse trammaatschappij (HTM).

	Tram-exploitatie staken	Snelheids-beperking	Acceptabel	Snelheids-beperking	Tram-exploitatie staken
Spoorwijdte	< 1430 mm	< 1435 mm	1435-1455 mm	> 1455 mm	> 1465 mm
Horizontale ligging	xxx	xxx	0-30 mm/6 m	> 30 mm/6 m	> 40 mm/6 m
Verticale ligging	xxx	xxx	0-20 mm/6 m	> 20 mm/6 m	> 30 mm/6 m
Scheluwte	xxx	xxx	0-20 mm/6 m	> 20 mm/6 m	> 30 mm/6 m
Verkanting afwijking	xxx	xxx	0-30 mm/6 m	> 30 mm/6 m	> 50 mm/6 m

Figuur 5.5 / Richtlijnen Haagse trammaatschappij (HTM).

5.1.4 Beheersing grondwaterstanden

Het grondprofiel in het projectgebied kent drie verschillende watertafels, die door tussenliggende, weinig doorlatende lagen van elkaar gescheiden worden. Van boven naar onder zijn dit het freatische waterpeil, het holocene waterpeil en het pleistocene waterpeil, waarbij de waterstanden en waterspanningen afnemen van boven naar onder (er is met andere woorden sprake van een wateronderspanning in het holocene en pleistocene grondpakket).

Opdrachtnemer diende er zorg voor te dragen dat er geen kortsluiting zou ontstaan tussen de onderlinge watertafels ten gevolge van de werkzaamheden. Door de realisatie van de tunnel kon er ook een zekere barrièrewerking van de natuurlijk aanwezige grondwaterstroming ontstaan. Als dit scenario zich zou manifesteren, moest de opdrachtnemer mitigerende maatregelen treffen in de vorm van hevels om dit effect weg te nemen.

Tot slot werd er vanuit het Hoogheemraadschap Delfland ook de eis gesteld dat de waterstanden ten gevolge van de werkzaamheden niet zouden stijgen boven eerder gemeten maximale waterstanden, noch zouden dalen onder eerder gemeten minimale waterstanden in de referentiepeilbuizen zoals gekend bij het Hoogheemraadschap Delfland. Deze eis was bovendien opgesplitst naar de verschillende watertafels.

5.2 Monitoringsfilosofie en -strategie

5.2.1 Algemeen

De opvolging van het risico op ongewenste vervorming aan gebouwen en sporen werd bereikt door de vervormingsmetingen (bovengrondse registraties) binnen het directe invloedsgebied van de tunnel.

Grondvervormingen (ondergrondse registratie), veroorzaakt door het bouwproces, werden gemeten met behulp van (grond)inclinometers. Om, indien gewenst, een eenduidig verband te kunnen leggen tussen grondvervormingen en diepwandvervormingen werden voorzieningen (stalen kokers) in de diepwandpanelen ter hoogte van de grondinclinometers aangebracht. In deze kokers kon dan met inclinometers ook de deformatie van de diepwand gemeten worden.

De grondwaterstand (ondergrondse registratie) binnen en buiten de bouwkuip en in de verschillende watervoerende lagen in de omgeving van de tunnel werd met peilbuizen gemeten. Tevens werden de debieten van de diverse bemalingen geregistreerd. Hierdoor kreeg men voldoende inzicht in het gevaar van opbarsten van de bouwkuipbodem en de beïnvloeding van de diverse watertafels en grondwaterstromingen.

Inzicht in het risico op schade door trilling werd verkregen door tijdens trillingsveroorzakende bouwmethoden, zoals het inbrengen en verwijderen van damwanden, het inbrengen van funderingselementen en sloopwerkzaamheden in de nabijheid van gebouwen, trillingsmetingen te verrichten.

Al deze monitoringsactiviteiten gaven aan wanneer bepaalde uitvoeringsactiviteiten gestopt moesten worden en/of er mitigerende maatregelen toegepast moesten worden.

5.2.2 Controle rekenmodel

Het rekenmodel en de gehanteerde grondparameters werden gedurende de bouwfasen geverifieerd aan het begin van het diepwandtracé van de Phoenixstraat en het station. In de Phoenixstraat gaven de locaties ter plaatse van de Binnenwatersloot en de Kloksteeg de meeste ruimte in dwarsrichting op de oostwand om de grondvervormingen intensief te monitoren aan het begin van de realisatiefase. Om naast de gegevens van de gebouwdeformaties (met miniprisma's en zettingsbouten) en de horizontale ondergrondse deformaties (met inclinometers) ook de theoretisch aangenomen zettingstroggen te kunnen verifiëren, werden hiervoor raaien van fenomarkers loodrecht op de tunnel-as aangebracht. De resultaten werden per fase door de aannemer (Combinatie Crommelijn, CCL) geanalyseerd en vergeleken met de predictieberekeningen.

5.2.3 Vervormingsmetingen

De vervormingen werden gemeten met miniprisma's (met *robotic total stations*, RTS'en, zie FIGUUR 5.6), zettingsbouten, lintvoegmetingen en 3D-laserscans.

Figuur 5.6 / Robotic total station, RTS.

De miniprisma's konden in de praktijk alleen aan de voorzijde van de gebouwen worden geplaatst. Dit werd veroorzaakt door de inplanting van de RTS'en in relatie tot de in te meten prisma's, alsook door het gegeven dat de meeste panden in de Phoenixstraat gebouwen zijn met gemeenschappelijke zijgevels, dan wel gescheiden door zeer smalle straatjes. De prisma's bevonden zich op een relatief hoog niveau van circa 3 meter boven maaiveld.

Bij klasse III en IV panden, waarbij de toelaatbare bijkomende vervormingen (zeer) klein waren, werden twee lagen (op 3 en 6 meter boven maaiveld) prisma's geplaatst wanneer het gebouw voldoende hoog is. Hierdoor was het mogelijk om meer nauwkeurig de horizontale rek ε_h te bepalen. Per laag werden minimaal twee prisma's aangebracht.

Bij de gebouwen werd tevens een zettingsboutje op een laag niveau onder de prisma's geïnstalleerd. Waar mogelijk werden ook de zijgevels voorzien van zettingsboutjes. Na een kritieke fase kon men een meting van deze bouten doorvoeren en zodoende de metingen van de prisma's controleren.

Figuur 5.7 / Plaatsing van prisma's en zettingsboutjes (Phoenixstraat 32).

Wanneer een nog vollediger beeld van de zakkingen binnen een deelgebied gewenst was, kon men door middel van hernieuwde 3D-scans hier een invulling aan geven. Bij aanvang van het project werden alle naburige gebouwen vastgelegd met een 3D-scan. 3D-laserscantechnologie brengt de wereld rondom ons tot op millimeterniveau in kaart. Hoogtechnologische scanners registeren honderdduizenden punten per seconde. Elk punt is een duidelijke millimeternauwkeurige xyz-meting in kleur. Al deze punten samen vormen een fotorealistische puntenwolk waarbinnen je kunt navigeren, en die de werkelijke situatie weergeeft. Wanneer deze inmeting op een later tijdstip herhaald wordt, kan men een vergelijking maken van beide scans en zodoende een globaal beeld krijgen van alle deformaties die zijn opgetreden in de tussenliggende tijd.

Figuur 5.8 / Puntenwolk van 3D-scan bestaande stationsgebouw.

5.2.4 Fasering monitoring

Bij de uitvoering van de werkzaamheden werd onderscheid gemaakt tussen de eerste fase, de bouw van de oostbuis en een gedeelte van de westbuis, en de tweede fase, de bouw van de parkeergarage en het overige gedeelte van de westbuis. In het jaar voorafgaand aan de twee verschillende bouwfasen werden de objecten binnen de invloedssfeer van de betreffende werkzaamheden op maandelijkse basis gemeten. Dit had als doel om seizoens- en dag/nacht-invloeden te kunnen onderscheiden.

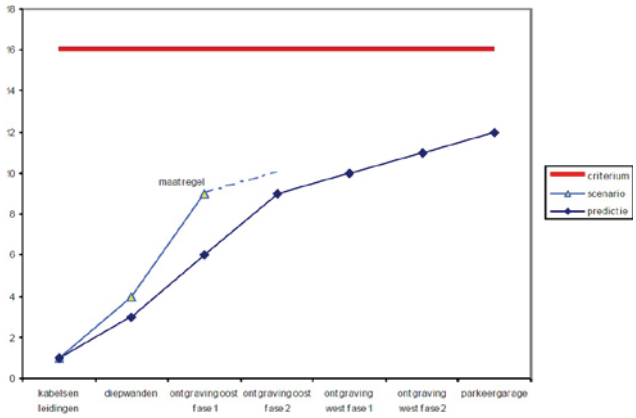
De monitoring zoals bedacht voor de eerste fase kan onderverdeeld worden in drie delen:
- De nulmeting.
- De continue metingen tijdens de zettingsveroorzakende activiteiten.
- De extra ad-hoc metingen.

Nulmeting

Voorafgaand aan de werkzaamheden werd de nulsituatie vastgelegd. De verkregen informatie diende als referentie voor het beoordelen van eventueel tijdens de bouwwerkzaamheden optredende schade. Deze nulmeting omvatte:
- Inmeten van alle zettingsbouten.
- Opname van alle belendingen in het invloedsgebied door middel van een 3D-scan.
- Opname van de aanwezige schade/scheurvorming (wijdte, hoeveelheid, locaties, etc.) aan de belendingen binnen het invloedsgebied.
- Initiële scheefstand belendingen binnen het invloedsgebied met lintvoegmetingen.
- Volcontinue monitoring van alle prisma's gedurende één maand voorafgaand aan start werkzaamheden.
- Volcontinue meting van enkele peilbuizen gedurende enkele maanden voor start werkzaamheden.

Continue metingen tijdens zettingsveroorzakende activiteiten

Vanaf start werkzaamheden tot minimaal een maand na het einde van de werkzaamheden werden de volgende zaken volcontinu gemonitord:
- De x-, y- en z-waarden van de prisma's tijdens de uitvoering van de verschillende bouwfasen. Het doel hiervan was:
  - Toetsen of de daadwerkelijk optredende vervormingen van omliggende gebouwen en infrastructuur de contractueel toegestane vervormingen niet overschreden en in het geval van abrupte overschrijding – wat kan duiden op een calamiteit – een waarschuwing afgeven.
  - Tijdens de bouw een indicatie geven van het vervormingsgedrag van de nabijgelegen bebouwing, waarbij een overschrijding van tussentijds voorspelde vervormingen desgewenst tot een aanpassing van de bouwmethode kon leiden om te garanderen dat de totale eindzettingen binnen de contractuele toegestane vervorming bleven.



Figuur 5.9 / Scenario van meetwaarden.

  - In het geval van schade inzicht geven in de oorzaak.Ten tijde van de uitvoering van de oostbuis werden de panden grenzend aan de Spoorsingel laagfrequent gemeten of indien hier aanleiding toe was, met een minimum van een keer voor de start en een keer bij gereedkoming. Ten tijde van de uitvoering van de westbuis werden zowel de gebouwen aan de oost- en westzijde van de tunnel gemonitord.
- De grondwaterstanden binnen en buiten de bouwkuip. Het doel hiervan was:
  - Toetsen of de grondwaterstanden buiten de bouwkuip niet lager werden dan de door het Hoogheemraadschap toegelaten waarden, omdat deze aanleiding zouden kunnen geven tot zettingen van de belendende structuren.
  - Toetsen of er geen kortsluitingen werden gecreëerd tussen de onderling verschillende watertafels.
  - Toetsen of er geen barrièrewerking optrad ten gevolge van de aanleg van de tunnel.
  - Nagaan of de in het ontwerp aangenomen grondwaterstanden klopten met de realiteit en tevens controleren of het aangenomen bemalingsdebiet door DSM gerealiseerd werd.

Extra ad-hoc metingen
Wanneer meetdata vanuit het volcontinue monitoringssysteem hiertoe aanleiding gaven, kon men ad-hoc extra metingen verrichten teneinde een beter inzicht te krijgen in de opgetreden effecten. Deze ad-hoc metingen waren:
- Inmeting manuele peilbuizen.
- Herinmeting zettingsbouten.
- Herinmeting lintvoegen.
- Herinmeting schade/scheurvorming.
- Heruitvoeren 3D-scan.
- Inmeten diepwand- en/of grondinclinometers.
- Bijkomende metingen met behulp van later aangebrachte meetapparatuur zoals extra prisma's, stickers, scheurwijdtemeters en dergelijke.

5.2.5 Procesbeheersmaatregelen

De verschillende frequent geregistreerde meetdata (prisma's en peilbuizen) werden ofwel rechtstreeks, ofwel via afgeleide waarden getoetst aan vooraf vastgelegde grenswaarden en daaraan gekoppelde signaal- en interventiewaarden (zie PARAGRAAF 5.2.6 voor een uitleg van de manier van afleiden). Wanneer de signaal- of interventiewaarde van een meetpunt benaderd of overschreden werd, werd een vooraf vastgelegd stappenplan van acties doorlopen.

Bij overschrijdingen van signaal- of interventiewaarden werden automatisch waarschuwingen verzonden naar de monitoringsdeskundigen en de hoofduitvoerder van CCL. Daarnaast werd dagelijks een controle van het gehele meetsysteem uitgevoerd om eventuele trends die konden leiden tot het bereiken van signaalwaarden vroegtijdig te kunnen constateren. Vervolgens werd bij het benaderen of bereiken van een signaalwaarde melding gemaakt richting CCL om het werkproces te analyseren en eventueel de monitoring uit te breiden. Tevens werd door de onderaannemer monitoring Advin/IV-Infra een logboek bijgehouden inzake de geconstateerde afwijkingen.

Overschrijding alarmwaarden belendende constructies
Bij overschrijding van de signaalwaarde en benadering van de interventiewaarde werd opnieuw het werkproces geobserveerd. Tevens werd er een besluit genomen, in overleg met ontwerpmanager, projectmanager en hoofduitvoerder, inzake het voortzetten van de uitvoering; het go/no-go-overleg. Daarnaast werd er naar ProRail een melding gemaakt van de geconstateerde afwijking.

Bij overschrijding van de interventiewaarde en benadering van de grenswaarde werden de uitvoeringswerkzaamheden gestopt. Dit besluit werd wederom genomen met een team van ontwerpmanager, projectmanager en hoofduitvoerder. Tevens werd er van de geconstateerde afwijking en de te nemen maatregelen een melding gedaan bij ProRail, bouw- en woningtoezicht en projectdirectie van CCL.

Een overzicht van alle deellocaties van de uitvoering met de daarbij behorende status van de prisma's en de genomen vervolgbeslissingen (go of no-go) werd dagelijks verstuurd naar alle leidinggevenden binnen de projectorganisatie, opdat iedereen op de hoogte was van de actuele stand van zaken.

Om de lopende stand van zaken te volgen, was er een tweewekelijks regulier overleg tussen enerzijds Advin/IV-Infra met CCL en anderzijds CCL met ProRail om alle werkzaamheden die raakvlak hebben met monitoring te bespreken. Daarnaast had CCL de beschikking over een calamiteitentelefoon waarop meldingen van derden konden binnenkomen. Er waren vijf incidentenniveaus gedefinieerd:
- Niveau 5: CCL informeert ProRail achteraf via afwijkingsprocedure.
- Niveau 4: CCL informeert ProRail.
- Niveau 3: klein monitoringsteam ProRail/CCL komt in actie.
- Niveau 2: groot monitoringsteam ProRail/CCL komt in actie.
- Niveau 1: direct 112 bellen en bouw- en woningtoezicht inschakelen.

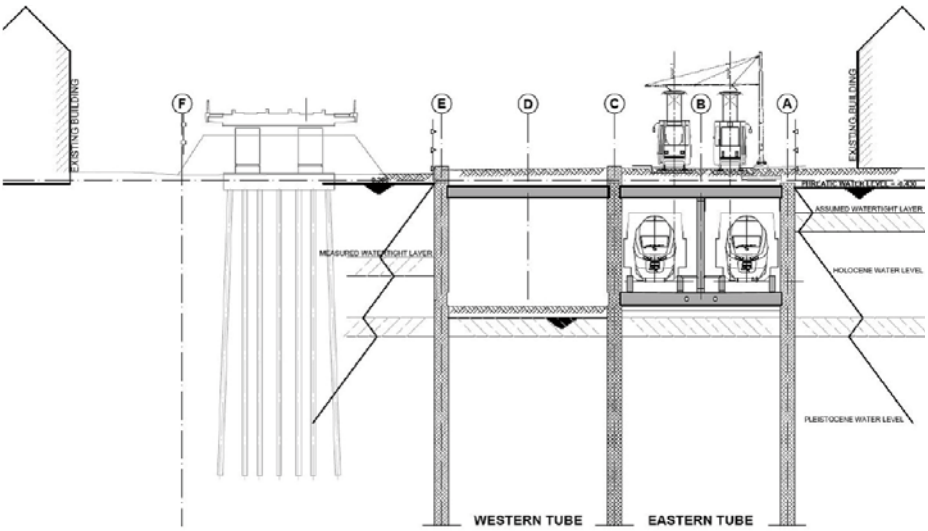
Voor elk incident werden belbomen opgesteld met de betrokkenen die geïnformeerd dienden te worden.

Het niet goed functioneren van het monitoringssysteem kon leiden tot het niet-alarmeren vanuit Argus (softwarepakket voor opslaan en analyseren meetdata) richting Advin/IV-Infra, waardoor de vervolgstappen geen doorgang zouden vinden. Dit kon gebeuren onder de volgende omstandigheden:
- Slechte weersomstandigheden zoals mist, sneeuw en zware regenval.
- Obstakels in zichtlijnen tachymeters.
- Schade aan monitorinsgmiddelen.
- Diefstal tachymeter en/of koperkabels.

In dit soort situaties werd door Advin/IV-Infra de melding van het (lokaal) niet-functioneren aan CCL gemeld. Afhankelijk van de aard van de werkzaamheden, locatie en faseringstap werd door CCL besloten om de werkzaamheden al dan niet te staken tot het monitoringssysteem weer geheel functioneerde.

Overschrijding alarmwaarden grondwaterstanden/stijghoogten
Wat de procesbeheersmaatregelen inzake de grondwaterstanden betreft was de werkwijze nagenoeg identiek aan die voor de belendende structuren. In deze materie speelde echter het waterschap een belangrijke rol als bevoegd gezag.

Er dient hier een onderscheid gemaakt te worden tussen enerzijds het freatische waterpeil en de stijghoogte in de tussenzandlaag, en anderzijds de stijghoogte in het pleistocene zandpakket. In het eerste geval is het risico vooral dat de ondergrens werd onderschreden ten gevolge van lekkage in de bouwputwand waarin werd bemalen. In het tweede geval werd een onderschrijding van de ondergrens niet relevant werd geacht gezien de historisch fenomenaal hoge toegepaste bemalingsdebieten door DSM. Het was dan ook bij de twee bovenste watertafels dat er bij onderschrijding van de ondergrenzen acties (in overleg met het bevoegd gezag) noodzakelijk waren.



Figuur 5.10 / Grondwaterpeilen.

Bij het bereiken van de signaalwaarde werd een onderzoek uitgevoerd naar de oorzaak, en werden er passende maatregelen gezocht en doorgevoerd. Het gehele proces werd opgenomen in het logboek. Met 'passende maatregelen' werd hier doorgaans het opzoeken en dichten van lekkages bedoeld.

Wanneer de interventiewaarden werden bereikt, werd het bevoegd gezag ingelicht. Uiteraard werden weer de gepaste maatregelen getroffen en vastgelegd in het logboek. Ook hier werd gedacht aan het opzoeken en dichten van de lekkages, eventueel in combinatie met een verlaging van de bemaling.

Bij het bereiken van de grenswaarde kon besloten worden om de bemaling stop te zetten. Wanneer dit uit veiligheidsoverweging niet mogelijk was (opbarstgevaar bouwputbodem) kon overgegaan worden op het inzetten van een retourbemaling. Het bleek niet nodig te zijn om dit toe te passen.

Wanneer de bovengrens werd overschreden in de diverse watertafels, dan gaf dit doorgaans weinig aanleiding tot urgente interventies, wat niet wegnam dat er een onderzoek gedaan moest worden naar de oorzaak van deze overschrijding. Wanneer een overschrijding in het freatische waterpeil en/of de stijghoogte in de tussenzandlaag het gevolg was van het barrière-effect van de tunnel in het bestaande grondwaterstromingsregime, dienden duurzame oplossingen met hevels uitgewerkt te worden. Dit is nooit het geval geweest. Ook de retourbemaling van het water afkomstig van de spanningsbemaling van het pleistocene zandpakket kon voor een te grote verhoging zorgen van de waterstanden/stijghoogten nabij het retourveld en zodoende tot wateroverlast leiden. Dit scenario diende ook met gepaste monitoring opgevolgd te worden. Om de retourbemaling goed te kunnen inregelen en om te bewaken dat de retourbemaling op zijn beurt niet zou leiden tot overlast, werden de effecten van de retourbemaling op de freatische grondwaterstanden en de stijghoogte in de tussenzandlagen door middel van het bestaande peilbuizennetwerk gemonitord.

Wanneer de ondergrens in een peilbuis werd geconstateerd en er geen mitigerende maatregel uitgevoerd kon worden zodat de grondwaterstand/stijghoogte weer stijgt, werd een retourbemaling opgestart die zich uitstrekte over een afstand van minstens 20 meter in beide richtingen vanaf de peilbuis waarbij de grenswaarde is bereikt. De retourbemaling bevindt zich altijd tussen de zettingsgevoelige gebouwen en de bouwkuip. Voor deze retourbemaling is gebruikgemaakt van holoceen lekwater en regenwater.

5.2.6 Grenswaarden monitoringspunten

De verschillende grenswaarden en de daaraan gerelateerde signaal- en interventiewaarden werden bepaald op basis van de achterliggende eisen zoals vastgelegd in documenten:

- Deformaties gebouwen: SRA.
- Deformaties treinspoor: Onderhoudsdocument instandhoudingsspecificaties spoor.
- Deformaties trambaan: HTM-infra voorschriften sporen.
- Waterstanden: Plan van aanpak bemalingen.
- Geluid: Wet geluidhinder.
- Trillingen: SBR-richtlijn A.

Vervorming gebouwen

In tegenstelling tot de hierboven vermelde criteria waren de grenswaarden voor de deformaties van gebouwen niet de waarden waarbij er niet meer voldaan werd aan de gestelde eisen, maar de voorspelde waarden van de maatgevende uitvoeringsstap. Ondanks het feit dat er dikwijls nog een grote reservecapaciteit aanwezig was tussen deze in het monitoringssysteem ingestelde grenswaarden en de daadwerkelijke grenswaarden (= waarbij niet meer voldaan werd aan gestelde criteria) was er bewust voor deze optie gekozen, enerzijds omdat deze het makkelijkst te implementeren was in het geautomatiseerde waarschuwingssysteem, en er anderzijds op deze manier een signaal gegeven zou worden wanneer de realiteit buiten afweek van de rekentechnische voorspellingen.

Om een vergelijking te kunnen maken tussen de contractueel gestelde eisen (polynomen van maximaal toelaatbare combinaties van relatieve hoekverdraaiingen ß en horizontale rekken ε_h) en de meetresultaten van het monitoringsproces, diende eerst een vertaalslag gemaakt te worden. De monitoring gebeurde immers op basis van het inmeten van spiegels aan de voorgevels van de panden op een niveau van 3 meter boven maaiveld. Bij sommige panden was zoals eerder gesteld een bijkomende rij spiegels op 6 meter boven maaiveld beschikbaar. De vertaalslag was als volgt:

Uit de inmeting van het monitoringssysteem werd voor elk spiegeltje een horizontale ($U_{x;gemeten}$) en verticale ($U_{y;gemeten}$) verplaatsing gemeten. De horizontale verplaatsing van het spiegeltje diende gecorrigeerd te worden naar een horizontale verplaatsing op niveau van de fundering. Dit kon gebeuren met resultaten van de tweede hoge spiegelrij (indien beschikbaar) of op basis van de (theoretische) helling ($\omega_{ontwerp}$) uit de FEM-predictieberekening.

Met $H = H_f$ (hoogte of diepte fundering) + H_p (hoogte prisma), wordt de gecorrigeerde waarde:

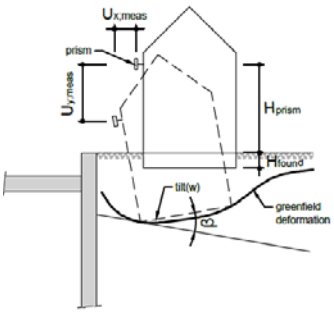
$$U_{x;gemeten;cor} = U_{x;gemeten} + H \cdot \omega_{ontwerp}$$

Zodat de horizontale rek gevonden kan worden met de formule:

$$\varepsilon_{h;gemeten} = (U_{x;gemeten;cor} / U_{x;gemeten;ontwerp}) \cdot \varepsilon_{h;gemeten;ontwerp}$$

De relatieve hoekverdraaiing wordt gevonden met de formule:

$$ß_{gemeten} = ß_{ontwerp} \cdot (U_{y;gemeten} / U_{y;ontwerp})$$



Figuur 5.11 / Vertaalslag meetdata.

De voorgaande formules koppelen de verplaatsingen van de voorgevel aan het theoretisch veronderstelde deformatiegedrag van het gehele gebouw. De optredende grondderformaties onder de gebouwen werden dus verondersteld de theorie te volgen; enkel in absolute grootte werden ze gerelateerd aan de meetwaarden van de prisma's.

Om de signaal- en interventiewaarden te bepalen, werden de polynomen die de begrenzing van het gekleurde gebied voor de verschillende kwaliteitsklassen afbakenen, vermenigvuldigd met respectievelijk de factor 0,75 en 0,90.

Vervormingen trein- en tramspoor
De gestelde grenswaarden van de treinsporen bij schift, verkanting en scheluwte konden vertolkt worden naar de inmetingen van de prisma's die om de 6 meter op een dwarsligger van het spoor geplaatst waren. Ook hiervoor werden de factoren 0,75 en 0,90 aangehouden om de signaal- en interventiewaarden vast te leggen.

Aangezien de ligging van de trambaan steeds manueel werd ingemeten, werd hier geen signaal- en interventieniveau vastgelegd. Op basis van de inmetingen werd in overleg met de opdrachtgever beslist of op korte termijn een correctie van de spoorligging uitgevoerd moest worden. Om ervoor te waken dat er tussen twee metingen onaanvaardbare situaties zouden ontstaan, werden de tramsporen op een zeer frequente basis ingemeten.

Waterstanden
Daar het peilbuizennet dat gemonitord was in de periode 2008-2009 niet voldoende het projectgebied afdekte, enerzijds door te veel blinde vlekken en anderzijds door in onbruik geraakte peilbuizen, werden door CCL meteen bij aanvang van het project bijkomende peilbuizen geplaatst om de grondwaterstanden ter plaatse van de zettingsgevoelige bebouwing te kunnen monitoren. Deze nieuwe peilbuizen werden samen met de bestaande peilbuizen gehanteerd om de waterstanden te monitoren. De peilbuizen werden alternerend om de 50 meter om de beide zijden van de bouwkuip geplaatst. Zo was er telkens minimaal een set peilbuizen per compartiment.

Basisidee van de monitoring was de aanname dat de waterstanden/stijghoogten ten gevolge van werkzaamheden niet de laagst gemeten waterstand (periode 2008-2009) mocht onderschrijden, noch de hoogst gemeten waterstand (periode 2008-2009) mocht overschrijden. Deze minima en maxima werden per peilbuis vastgelegd, alsook een gemiddelde waterstand. De grenswaarden van de waterstanden werden ook met behulp van de factoren 0,75 en 0,90 omgezet naar respectievelijk signaal- en interventiewaarden.

5.2.7 Planning en meetfrequentie

De uitvoeringsfrequentie van de monitoringswerkzaamheden en de meetperiode hebben een een-op-eenrelatie met de planning van de werkzaamheden van CCL.

In het jaar voorafgaand aan de start van de aanleg van de oost- en westbuis werden een aantal metingen uitgevoerd om het natuurlijke proces van de omgeving te monitoren. Door de metingen één jaar, of zo ver mogelijk, vóór de daadwerkelijke werkzaamheden te starten, kon een onderscheid gemaakt worden tussen monitoringsdata die wel en niet gerelateerd waren aan de werkzaamheden.

Voorafgaand aan de uitvoeringsfase werd een nulmeting uitgevoerd en formeel vastgelegd. Eén maand voor start werkzaamheden werd de volcontinue monitoring van de prisma's aan de gebouwen opgestart. Aan het einde van deze periode werd voor ieder meetpunt de nulwaarde bepaald als zijnde een gemiddelde van alle metingen. De meetfrequenties werden bepaald door de afdeling Ontwerp van CCL in overleg met Advin/IV-Infra op basis van de te verwachten deformaties.

Werkzaamheden die grote invloed hadden op de omgeving kregen een intensieve/ continue monitoring. Na beëindiging van de uitvoeringswerkzaamheden werd de ingestelde meetfrequentie gedurende één maand gehandhaafd om mogelijke na-ijleffecten afdoende te kunnen registreren. Indien er in de laatste week geen deformaties meer geregistreerd werden, konden de metingen worden stopgezet of teruggebracht naar een lagere frequentie tot aan de start van de volgende zettingsveroorzakende bouwfase. Indien er wel nog deformaties werden waargenomen, werd de meetperiode telkens met één week verlengd.

Voor de monitoring van de peilbuizen werden onderstaande frequenties ingesteld:
- Minimaal een keer per maand en minimaal een keer na elke ontgravingsfase in niet-kritieke fasen (dit zijn fasen waar het opbarstgevaar nog niet aan de orde is).
- Dagelijks tijdens kritieke fasen (opbarstgevaar is reëel).
- Continu in geval van bemaling. Hierbij wordt een aanloop- en uitloopfase van telkens twee weken vóór en na de bemaling voorzien.

5.3 Opbouw monitoringssysteem

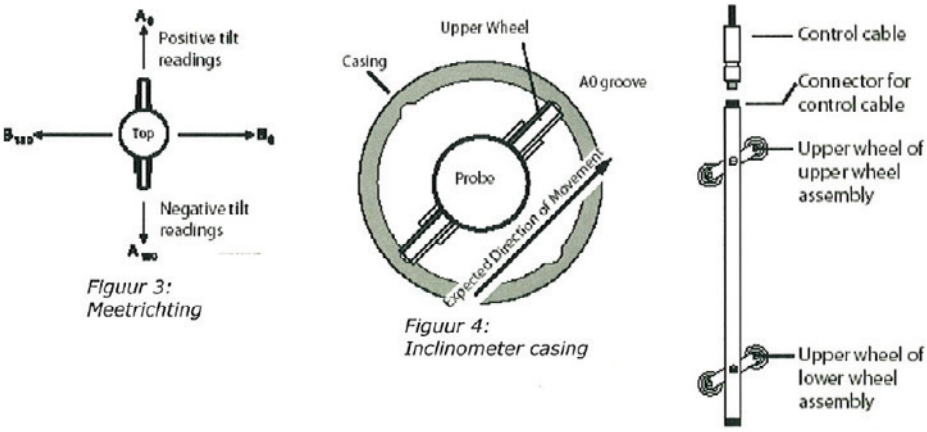
In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de gebruikte monitoringsmiddelen en -technieken om alle benodigde metingen te kunnen uitvoeren.

5.3.1 Inclinometers

De horizontale vervormingen van de grond en de diepwanden werden gemeten met behulp van een inclinometersysteem.

De inclinometercasing werd geïnstalleerd in een verticaal uitgevoerde pulsboring met een diameter van 180 millimeter die op een afstand van ongeveer 1 à 2 meter uit de diepwandpanelen gesitueerd was. Om enerzijds beschadiging te voorkomen, en anderzijds toch de invloed van de diepwandinstallatie te kunnen registreren, werden de inclinometers geplaatst na het maken van de diepwandgeleidewanden.

De ruimte tussen de grond en de casing werd opgevuld met een bentoniet-cementmengsel (zeven delen bentoniet, een deel cement). De afwerking/hoogte van de casing werd gelijk gehouden met het maaiveld en voorzien van een straatpot om beschadiging te voorkomen. De onderzijde van de inclinometer was voorzien op een niveau van 2 meter onder de onderzijde van de naastgelegen diepwand. Dit resulteerde in de plaatsing van de onderzijde van de inclinometer van enkele meters in het pleistocene zand, wat een voorwaarde was bij de plaatsing van inclinometers in de grond.



Figuur 5.12 / Inclinometer.

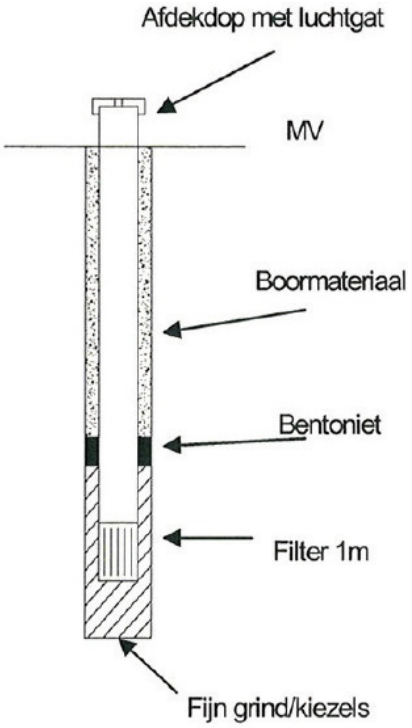
In de diepwanden werden voorzieningen gemaakt om, indien nodig, met inclinometers deformatiemetingen van de betreffende diepwandpanelen te kunnen maken. De voorziening (casing plus metalen beschermend kokerprofiel) diende tijdens het maken van de diepwandpanelen meegenomen te worden in de wapeningskooi van de diepwand. De onderzijde van deze kokers werd afgesloten op een niveau van 1 meter boven onderzijde diepwandpaneel. De casing werd dusdanig geplaatst dat de A-groef loodrecht op de tunnel-as stond, dus in de richting waarin de grootste deformaties verwacht werden. De inclinometersonde werd eenmaal met de hoge wieltjes in de richting van de te verwachten beweging geplaatst, en eenmaal 180 graden gedraaid. Het gemiddelde van beide metingen gaf de gepresenteerde waarde.

Na installatie van de inclinometercasing werd een nulmeting verricht.

5.3.2 Peilbuizen

Voor de bepaling van de hoogte van de grondwaterstanden werd gebruiktgemaakt van peilbuizen en piëzometers.

Een peilbuis is een holle pijp met een filtergedeelte van 1 meter aan de onderzijde van de buis. Om dichtslibben van de peilbuis met sedimenten zo veel mogelijk te voorkomen, werd de onderzijde voorzien van een afsluitdop en het filtergedeelte afgedekt met een filterkous.



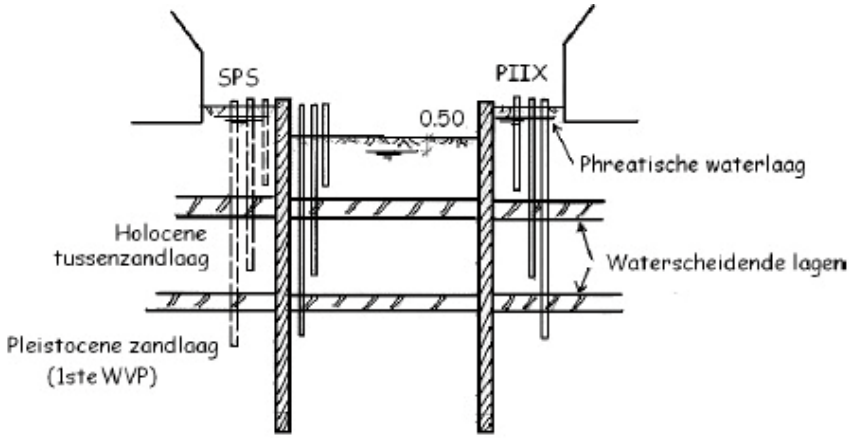
Figuur 5.13 / Peilbuis.

De peilbuis werd in het boorgat geplaatst, waarna het traject van 1 meter onder het filter tot 1 meter boven het filter met fijn grind of kiezels werd opgevuld. Meteen boven het filtergrind werd bentoniet in het boorgat gestort over circa 0,5 meter dikte. De rest van het boorgat werd opgevuld met het boormateriaal. De bovenkant van de buis werd op de gewenste lengte gebracht en afgedicht. In de afdekdop werd een klein gaatje geboord om het optreden van over- of onderdrukken boven het wateroppervlak in de peilbuis te voorkomen.

Op locaties waar bemaling werd toegepast, werden peilbuizen met piëzometers gebruikt. Piëzometers meten veranderingen in waterdrukken op een membraan en zetten deze om in een frequentie. Deze frequentie wordt op zijn beurt weer omgezet naar een druk. De meetwaarden dienen steeds gekalibreerd te worden aan de heersende atmosferische drukken en temperaturen.

Bij het ontwerp van het benodigde peilbuizennetwerk was rekening gehouden met:
- De ligging van de bouwkuipen en bemalingen.
- De locatie van de kwetsbare objecten.
- Bestaande meetpunten.
- Berekende verlagingen van freatisch grondwater en stijghoogten.

Uiteindelijk werden onderstaande peilbuizen in het netwerk opgenomen:
- Peilbuizen uit het bestaande netwerk. Dit zijn de peilbuizen die zijn gebruikt tijdens de periode 2008-2009. Deze peilbuizen werden zo veel als mogelijk opgenomen in het nieuwe meetnet. Een aantal van deze peilbuizen zijn in een eerder stadium al komen te vervallen als gevolg van werkzaamheden van derden.
- Peilbuizen van het nieuwe netwerk. Hierin wordt een verdere onderverdeling in vier types gemaakt:
  - Monitoringsraaien. Deze werden geplaatst om de waterstanden in het freatische grondwater en de watervoerende lagen ter plaatse van de zettingsgevoelige bebouwing te volgen. De peilbuizen werden bij voorkeur op de hoek van een huizenblok geplaatst, net voorbij de lijn van de voorgevel. Dit is de maatgevende locatie voor nadelige effecten ten gevolge van daling van de grondwaterstand. De onderlinge afstand tussen de monitoringspunten is onder andere afhankelijk van de afstand van zettingsgevoelige belendingen tot de bouwkuip en de graad van zettingsgevoeligheid van de belendingen zelf. Hart-op-hartafstanden tussen monitoringsraaien van 40 tot 120 meter werden aangehouden.
  - Peilbuizen nabij de bouwkuipen. Aan weerzijden van de bouwkuip werden alternerend om de circa 50 meter (dus elke 100 meter aan één zijde) telkens drie peilbuizen geplaatst. Dit is één peilbuis voor het freatische grondwater, één voor de stijghoogte in de tussenzandlaag en één voor de stijghoogte in het pleistocene zandpakket.



Figuur 5.14 / Peilbuizen nabij de bouwkuipen.

  - Peilbuizen nabij rand invloedsgebied. Op basis van gemaakte rekenscenario's was er een invloedsgebied bepaald waarvan op de rand zich een waterstandsverlaging van 5 centimeter zou manifesteren in de freatische grondwaterstand en/of stijghoogte van de tussenzandlaag. Dit was in het geval in een worstcasescenario van lekkage in bouwkuipwanden waarbinnen bemaling zou plaatsvinden. Voor deze peilbuizen

werd zo veel mogelijk gebruikgemaakt van bestaande peilbuizen die afkomstig waren van het vigerende waterschap.
- Peilbuizen nabij het retourveld. Nabij het retourveld werden drie peilbuizen geplaatst met peilfilters in het pleistocene zandpakket.

5.3.3 3D-laserscannen

Met 3D-laserscannen werden driedimensionale data (puntenwolken) van objecten en terreinen zoals ze in werkelijkheid zijn, opgemeten. De beelden die met 3D-laserscannen werden gegenereerd, zijn nauwkeurig en bevatten een hoog detailniveau.

De puntenwolk bestaat uit een dicht raster van punten waarbij voor elk punt de x-, y- en z-positie bekend was. Verschillende puntenwolken konden met elkaar vergeleken worden. Door het transformeren van twee in de tijd verschillende opnames was te herleiden waar veranderingen (zettingen, deformaties) plaatsvonden en in welke mate.

In het project Spoorzone Delft werden alle panden aan de Phoenixstraat, Bolwerk, Westvest en Spoorsingel die zich binnen de grenzen van het monitoringsplan bevonden (dus het invloedsgebied) gescand. Hiermee was er een nulopname uitgevoerd die kon dienen als basis.

5.3.4 Lintvoegmetingen

Met een lintvoegmeting werd de hoogteligging van een doorgaande horizontale voeg in het metselwerk vastgesteld. Wanneer men beschikt over een nulmeting, kan men met herhalingsmetingen een beeld krijgen van de zakkingsverschillen die zijn opgetreden sinds start bouwwerkzaamheden.

De lintvoegmetingen werden uitgevoerd in minimaal drie meetpunten langs elke bereikbare gevel en gebouwmuur: twee meetpunten in de hoeken en ten minste een meetpunt in het midden van het gebouw. Voor gebouwen met langere gevels zijn meetpunten op een onderlinge afstand van circa 5 tot 7 meter gekozen.

5.3.5 Robotic total stations en miniprisma's

Met behulp van een RTS werd de positie van een miniprisma ingemeten (absoluut en/of relatief). Het total station werd op een vaste locatie opgesteld, waarvandaan de positie van een aantal referentiepunten werd ingemeten. Op deze wijze kon de positie van het total station zelf worden bepaald, waarna de inmeting van de miniprisma's kon plaatsvinden.

Door de locatie van de miniprisma's op 3 meter boven maaiveld en de locatie van de total stations op 4 meter boven maaiveld, waren enkel stationaire obstakels hoger dan 3 meter een belemmering voor het meetsysteem. Wanneer deze obstakels niet verplaatst konden worden, werden de niet-gemeten prisma's gedraaid naar een ander total station die de metingen automatisch overnam. Als extra controle kon worden overgestapt op het handmatig meten van de zettingsboutjes en/of miniprisma's.

Het systeem kende enkele vooraf aangebrachte instellingen om een zo groot mogelijke nauwkeurigheid te bekomen en onjuiste meetdata te kunnen filteren:
- Elk meetpunt werd minstens twee maal gemeten in twee kijkerstanden.
- Er werden meettoleranties voor horizontale en verticale hoeken en gemeten afstanden ingesteld, waarbij bij overschrijdingen de metingen automatisch werden herhaald.
- Afwijkingen groter dan 200 millimeter ten opzichte van de nulwaarde werden weggefilterd.
- Metingen die niet gemaakt konden worden vanwege een accidentele hindernis werden tot twee keer herhaald.

Bij aanvang van installatie van het monitoringssysteem werd het terrein nauwkeurig verkend om de locatie van de total stations en de referentiepunten vast te leggen. Hierbij werd gelet op de bereikbaarheid van de total stations zelf en de zichtbaarheid van alle prisma's. Voor de referentiepunten werden uiteraard punten aan objecten gekozen die niet aan zetting onderhevig zijn. Door het plaatsen van meerdere referentiepunten en deze elke meetcyclus in te meten, werden de referentiepunten onderling gecontroleerd en werd het total station positie steeds opnieuw bepaald. De inplanting van de total stations gebeurde dusdanig dat de maximale afstand tussen de miniprisma's en de dichtstbijzijnde total station nooit meer dan circa 100 meter bedroeg. Voor het spoor op aardebaan werden elke 6 meter twee prisma's op éénzelfde dwarsligger van het oostelijke spoor geplaatst.

Om het spoorviaduct te monitoren, werden prisma's aan weerszijden bovenop de prefab brugdekken aangebracht, net vóór en na elke brugdekvoeg, alsook in het midden van elk prefab brugdek. Deze prisma's konden ingemeten worden door de vast opgestelde total stations die de gebouwen monitorden.

Figuur 5.15 / Monitoring van het projectgebied.

De volcontinue metingen met de total stations hadden een meetfrequentie van eenmaal per uur voor elk meetpunt en kon indien gewenst lokaal opgehoogd worden naar eenmaal per half uur. Deze data werden binnen de twee uur in Argus gepresenteerd. Handmatige metingen werden binnen vierentwintig uur gepresenteerd. Wanneer in het systeem signaal-, interventie- en grenswaarden waren ingevoerd voor meetpunten, dan werd ook automatisch de overschrijding van deze waarden gesignaleerd.

5.3.6 Zettingsboutjes

Wanneer het tijdelijk niet mogelijk was om de prisma's met de total stations in te meten, kon men steeds terugvallen op de zettingsboutjes. Zoals de naam al aangeeft, kon men met deze boutjes enkel verticale deformaties registreren.

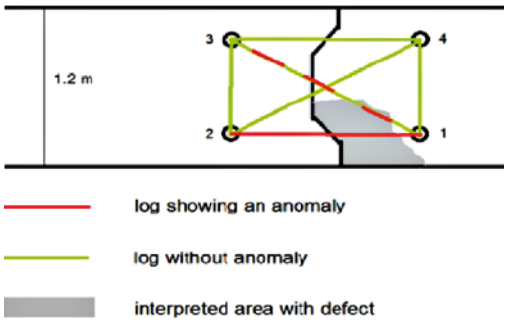
5.3.7 Crosshole sonic logging

Binnen het project Spoorzone Delft werd ook *crosshole sonic logging* (CSL) toegepast om vroegtijdig bentonietinsluitingen in de diepwanden te kunnen herkennen. Deze methode

gebruikt een ultrasone bron en ontvanger, waarmee vervolgens signaalsnelheden en signaalverliezen worden opgemeten. De snelheid van een signaal hangt immers af van de dichtheid van het materiaal dat het doorkruist. Zodoende kan met deze techniek het onderscheid gemeten worden tussen beton en bentoniet.

CSL levert weinig tot geen vertraging in het bouwproces op en is tegen beperkte kosten uit te voeren. Bovendien biedt de methode betrouwbare informatie waarmee men verantwoord kan besluiten tot preventieve reparatie.

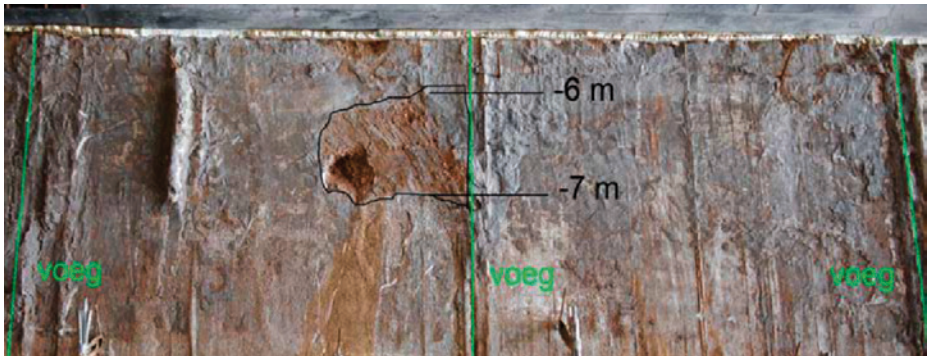
Aan beide hoeken van de wapeningskorven aan beide zijden van een paneelvoeg worden pvc sparingsbuizen opgehangen. Door na het verharden van het beton de zender en ontvanger in alle mogelijke combinaties in deze sparingsbuizen aan te brengen en metingen te maken over de volledige hoogte van het paneel (of minstens de hoogte die men wil verkennen), kan men mogelijke betonietinsluitingen in kaart brengen wat betreft locatie en afmeting.



Figuur 5.16 / Resultaat crosshole sonic logging rondom voeg.

CSL werd toegepast bij alle voegen in de nabijheid van bestaande bebouwing. Zo werden vrijwel alle voegen aan de oostzijde van de tunnel in de Phoenixstraat en alle voegen direct grenzend aan het oude stationsgebouw, van deze sparingsbuizen voorzien en achteraf doorgemeten. Deze grootschalige praktijkmetingen hebben veel informatie opgeleverd over de CSL-metingen. De bovenste 2 tot 3 meter diepwand leverden vrijwel altijd een slecht meetsignaal op, ook als de kwaliteit van de voeg na ontgraven toch in orde blijkt te zijn. Hierdoor was de CSL-methode in praktijk gedeeltelijk blind voor anomalieën in de bovenste 2 tot 3 meter.

In het project Spoorzone Delft is met succes een anomalie gelokaliseerd, geïnterpreteerd en gerepareerd. Na ontgraven bleek de anomalie inderdaad een zone met aanzienlijk potentieel lekrisico, exact op de positie waar deze werd verwacht. De uitgevoerde reparatie met jetgroutkolommen aan buitenzijde diepwandvoeg bleek afdoende te hebben gefunctioneerd.



Figuur 5.17 / Opgespoorde (en preventief gerepareerde) anomalie in diepwand Spoorzone Delft. (Bron: Rodriaan Spruit)

5.3.8 Dataverwerking en -visualisatie

Voor de monitoring van Spoorzone Delft werd voor de opslag, bewerking en presentatie van meetgegevens gebruikgemaakt van het softwarepakket Argus. Argus is een systeem waarmee het mogelijk is om de meetdata op te slaan, te verwerken, te presenteren en te toetsen aan eventuele signaal-, interventie- en grenswaarden.

Het systeem bestaat uit een server met daarop de software en een SQL-database. Deze server was vanwege brandveiligheid en inbraakgevoeligheid niet ter plaatse, maar bevond zich bij Interfels te Bad Bentheim (Duitsland). Hier werd dagelijks een back-up gemaakt. Alle meetdata werden gedurende het gehele project bewaard. Op de bouwlocatie stond een operator-pc die naast het dagelijkse beheer van Argus ook gebruikt werd voor de opslag van de ruwe data, waarbij wekelijks een back-up werd gemaakt.

De Argus-server was voor iedereen met een inlognaam en wachtwoord toegankelijk vanaf hun persoonlijke pc met internetverbinding. De inloggers zijn verschillende gebruiksrechten toegekend variërend van gast (enkel kijken) naar gebruiker (data toevoegen en bewerken) tot beheerder (instellingen wijzigen).

Indien een ingestelde alarmeringswaarde werd overschreden, werd door Argus automatisch een e-mail- en/of sms-bericht verzonden naar de belanghebbenden. In dit bericht werd aangegeven welk meetpunt welke alarmeringswaarde had overschreden.

In het systeem wordt een prisma weergegeven met een kleurcode die meteen zijn status aangaf. Zo duidt een groen prisma op gemeten deformaties kleiner dan de signaalwaarde, gele prisma's op gemeten deformaties tussen signaal- en interventiewaarde, rode prisma's op gemeten deformaties tussen interventie- en grenswaarde en een zwart prisma op gemeten deformaties groter dan de voorspelde grenswaarde.

Figuur 5.18 / Prisma's op Spoorsingel 48-50.

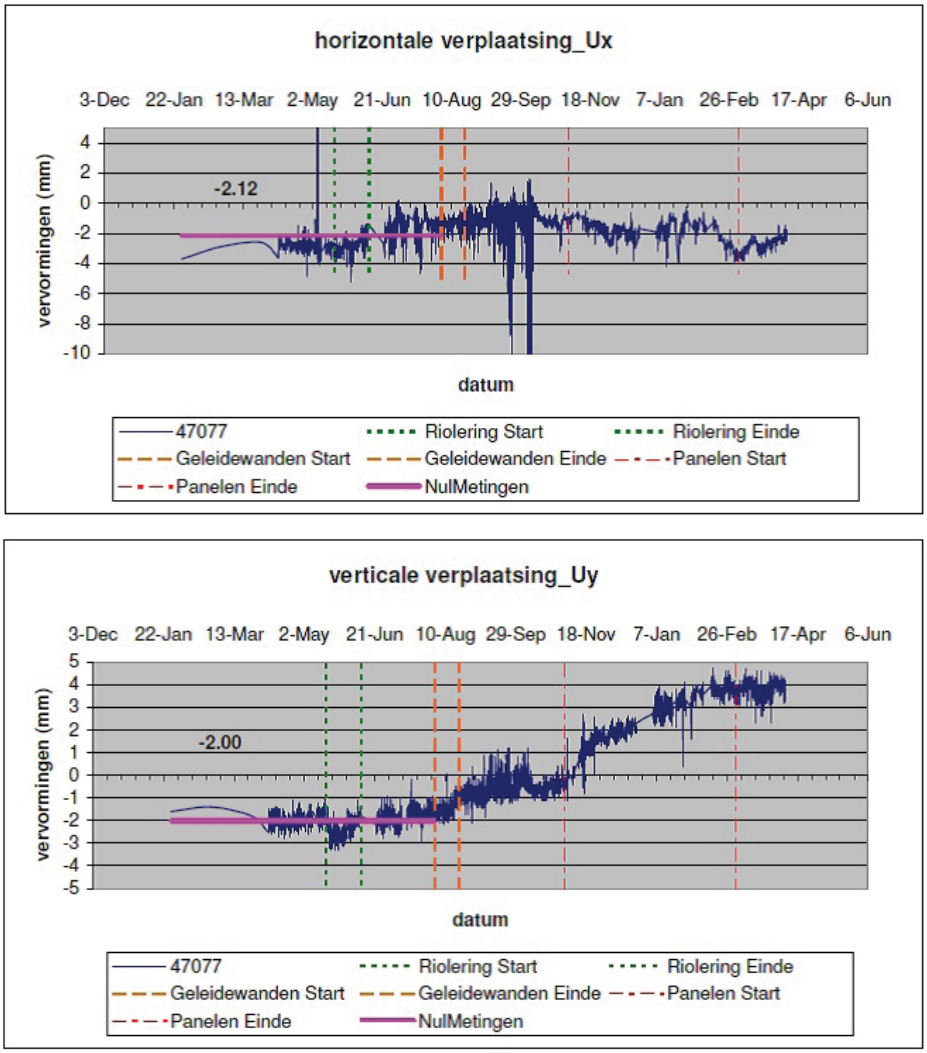
5.4 Praktijkervaring

Deze paragraaf gaat in op de opgedane ervaringen met het hiervoor besproken monitoringssysteem. Hierbij komt duidelijk naar voren dat het systeem merendeels voldeed aan de verwachtingen, maar dat er gaandeweg het project toch noodzakelijke verbeteringen zijn doorgevoerd. Bovendien toont de ervaring ook aan dat een goed functionerend en uitgebreid monitoringssysteem geen garantie biedt op het niet-optreden van ontoelaatbare deformaties.

5.4.1 Nulmetingen

Nulmetingen prisma's

Voor de monitoring in de eerste fase dienden er circa achthonderd miniprisma's aangebracht te worden. Nadien moest er de volcontinue monitoring met vaste opstelling van total stations opgestart worden om de nulmeting gedurende een voldoende lange periode te kunnen uitvoeren. Tijdens deze nulmetingsperiode werden er op verschillende locaties al werkzaamheden uitgevoerd door derden ten behoeve van het verleggen van kabels en leidingen. In de SRA-predictieberekeningen werden de deformaties ten gevolge van het verleggen van kabels en leidingen en het aanbrengen van de geleidewanden in één rekenstap samengebracht, ondanks het feit dat beide uitvoeringsstappen soms significant ver uit elkaar in de tijd lagen. Derhalve werden de nulwaarden van de prisma's gelijkgesteld aan de gemiddelde waarden van de metingen in de periode net voor aanbrengen geleidewanden, zoals duidelijk is te zien in FIGUUR 5.19.



Figuur 5.19 / Gelijkstelling nulwaarden prisma's.

De grenswaarden in Argus werden daarna ook aangepast in functie van de vastgelegde nulwaarden volgens onderstaand voorbeeld:
$U_{x;nulmeting}$ = -1,07 millimeter.
$U_{y;nulmeting}$ = -0,15 millimeter.
$U_{x;grenswaardeSRA}$ = 13,10 millimeter.
$U_{y;grenswaardeSRA}$ = 20,20 millimeter.
ð $U_{x;grenswaardeARGUS}$ = 13,10 – 1,07 = 12,03 millimeter.
ð $U_{y;grenswaardeARGUS}$ = 20,20 – 0,15 = 20,05 millimeter.

Aangezien de gemeten deformaties ten gevolge van het aanbrengen van de geleidewanden doorgaans (veel) kleiner waren dan de geprognotiseerde waarden (variërend tussen 0 en 2,6 millimeter), ook in die gevallen waar de activiteit van het verleggen van kabels en leidingen daadwerkelijk samenvielen met het aanbrengen van de geleidewanden, werd aangenomen dat in de overige gevallen de (voor de nulmeting opgetreden) deformaties ten gevolge van verleggen kabels en leidingen verwaarloosbaar waren.

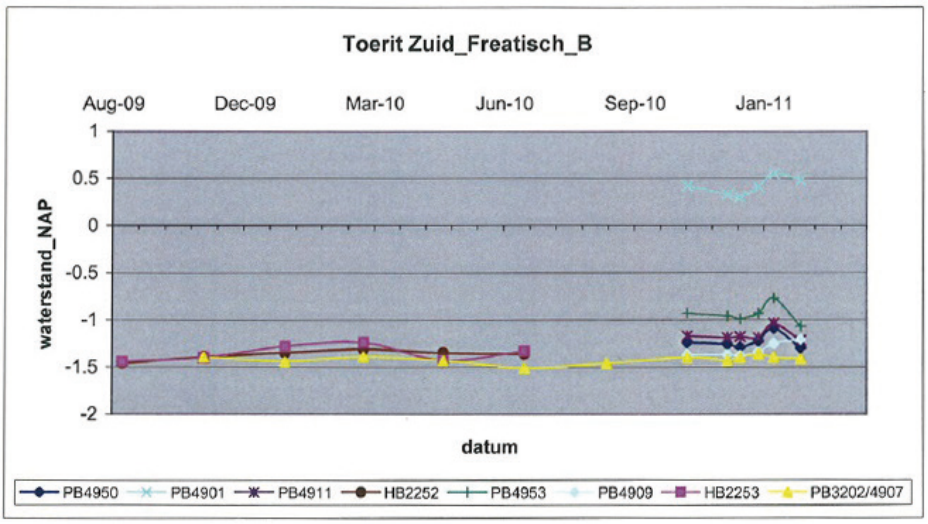
Controle op basis van inmetingen zettingsbouten
In de aanvangsfase van het project werden de zettingsbouten op vijf verschillende tijdstippen ingemeten, waarvan de werken ten behoeve van het van verleggen kabels en leidingen en aanbrengen van geleidewanden allemaal tussen de vierde en vijfde inmeting lagen. Op verzoek van opdrachtgever ProRail werd dan ook nagegaan of een evaluatie van deze inmetingen de hierboven geponeerde aannames kon onderbouwen.

De verschillen in y-waarden (verticale deformaties) van de zettingsbouten gaven in 28 van 108 gevallen een waarde die hoger lag dan de geprognotiseerde waarden. Nader onderzoek wees echter uit dat dit veelal ging om die locaties waar de geprognotiseerde waarden heel klein waren (tussen 0 en 1 millimeter) vanwege de afstand tussen diepwand en belendingen. Ook kon opgemerkt worden dat de variatie in de eerste drie zettingsboutmetingen ook gemakkelijk opliep tot 1 millimeter. Daarom kon men concluderen dat de meetruis op zettingsboutmetingen te groot was om enige harde conclusies te trekken.

Nulmetingen peilbuizen
In de ontwerp-watervergunning die door het Hoogheemraadschap van Delfland werd uitgereikt, werden voor zeven deelgebieden waarop de vergunning betrekking had de gemiddeld hoogste grondwaterstand/stijghoogte (GHG/GHS), de gemiddelde grondwaterstand/stijghoogte (GG/GS) en de gemiddeld laagste grondwaterstand/stijghoogte (GLG/GLS) vastgelegd, en dit voor de drie bestaande watertafels. Dit gebeurde op basis van een reeks peilbuizen die gedurende de periode oktober 2008 tot juli 2009 werden gemonitord.

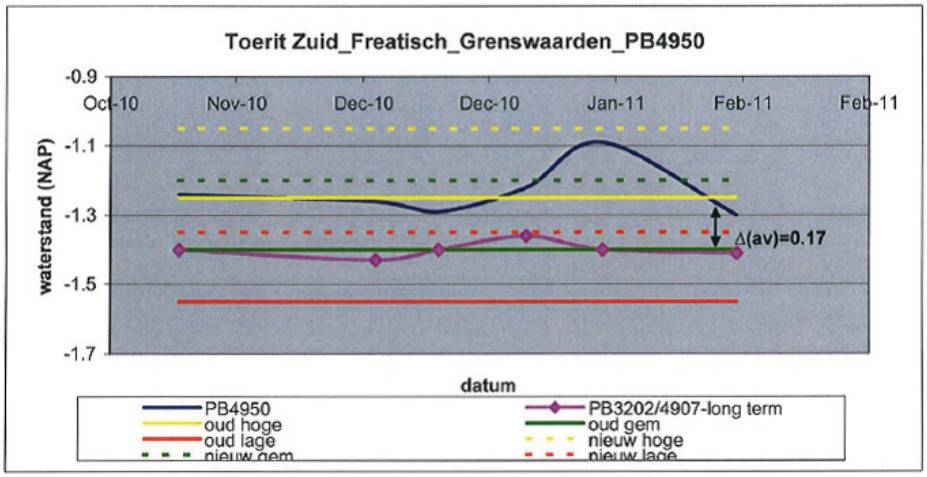
CCL heeft vanaf september 2010 peilbuizen bij geplaatst en heeft deze vanaf oktober 2010 samen met de bestaande peilbuizen op reguliere basis gemonitord. Aangezien de aanwezige bodemopbouw zeer heterogeen is, zijn de grondwaterstanden en stijghoogten (vooral in de tussenzandlaag) fors hiervan afhankelijk en bleek menig peilbuis reeds een grondwaterstand/stijghoogte aan te geven die buiten het bereik tussen GLG/GLS en GHG/GHS lag, en dit terwijl CCL nog geen beïnvloedende activiteiten had uitgevoerd. Daarom heeft CCL bij aanvang van het project een herijking van de (nieuwe) peilbuizen ter goedkeuring bij het Hoogheemraadschap ingediend teneinde een werkbare situatie te krijgen. Hiervoor werden peilbuisspecifieke grenswaarden gedefinieerd op de volgende wijze.

Over de periode waarin voor zowel de oude als nieuwe peilbuizen meetdata zijn geregistreerd, werd nagegaan of de nieuwe peilbuizen de tendens van de oude peilbuis volgden. Wanneer dit niet het geval was, werd nagegaan of hiervoor een verklaarbare reden gevonden kon worden, dan wel of de nieuwe peilbuis als incorrect beschouwd moest worden. FIGUUR 5.21 geeft de voorstelling van de fluctuaties van de freatische grondwaterstand door de tijd heen van zowel oude als nieuwe peilbuizen binnen het deelgebied Toerit Zuid.



Figuur 5.20 / Fluctuaties van de freatische grondwaterstand van zowel oude als nieuwe peilbuizen.

Wanneer we nu inzoomen op de overlappende periode wat betreft meetgegevens, dan kunnen we per peilbuis een gemiddelde afwijking bepalen tussen de meetwaarden van de nieuwe peilbuis en de overeenkomstige (op dezelfde data gemeten) meetwaarden van de oude peilbuis. In de veronderstelling dat de nieuwe peilbuis door het jaar heen dezelfde tendens als de oude peilbuis zal volgen, maar dan wel met een afwijking die gelijk is aan het gemiddelde van de tot dan toe geregistreerde verschillen (Δ(av)), zullen de grenswaarden van de nieuwe peilbuis gelijk zijn aan de grenswaarden van de oude peilbuis verhoogd/verlaagd met de bepaalde Δ(av). Dit wordt in FIGUUR 5.21 weergegeven.



Figuur 5.21 / Grenswaarden van oude en nieuwe peilbuis.

Op deze wijze werden per peilbuis voor het hele project de nieuwe grenswaarden bepaald. Nieuwe peilbuizen die een afwijkend gedrag vertoonden ten opzichte van de correspon-derende oude peilbuis werden als (tijdelijk) incorrect beschouwd. Ze werden echter in de eerstvolgende maanden nog gemonitord op dezelfde reguliere basis als de overige peilbuizen, aangezien een 'automatisch' herstel van het waterpeil in de desbetreffende peilbuis steeds tot de mogelijkheden behoorde. Langdurig afwijkend gedrag, zonder aantoonbare oorzaak, resulteerde uiteindelijk in een 'in onbruik raken' van de peilbuis. CCL kwam er al vrij snel in het proces achter dat een heleboel peilbuizen waarvan bedacht was dat het filter zich in de tussenzandlaag zou bevinden, eigenlijk de bovenliggende fre-

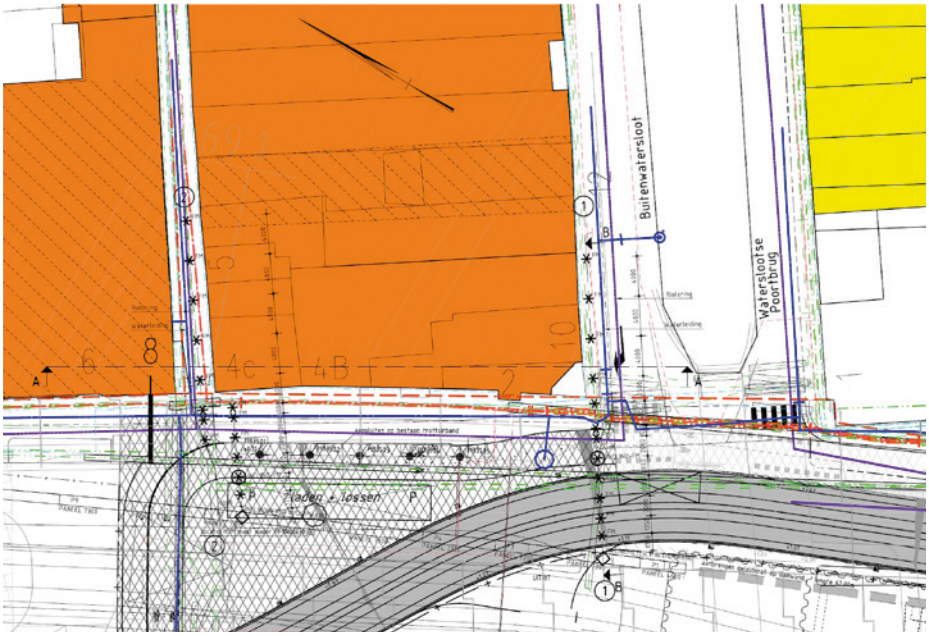
atische grondwaterstand monitorden. Hierdoor was het noodzakelijk om bijkomende peilbuizen met iets dieper gelegen filters te plaatsen om met voldoende dekking de tussenzandlaag te kunnen monitoren.

Wanneer een (bouw)activiteit in de eerste maanden oorzaak was van een afwijkende tendens in de peilbuiswaarden, werd in eerste instantie gecontroleerd of diezelfde tendens ook waarneembaar was in de nabije oude en/of nieuwe peilbuizen. Op basis van die gegevens kon bepaald worden of de gegevens foutief waren of de juiste verandering van grondwaterstand/stijghoogte ten gevolge van een activiteit weergaven.

In de eerste maanden werd de herijking geüpdatet. Hierbij werden de Δ(av) voor elke grondwaterstand/stijghoogte voor elke peilbuis opnieuw bepaald, maar telkens voor de steeds groter wordende overlappingsperiode van meetwaarden van oude en nieuwe peilbuizen. Op deze wijze kon men met een steeds grotere nauwkeurigheid de langetermijngrenswaarden per peilbuis vastleggen.

5.4.2 Validatiemetingen

Teneinde de uitgangspunten van het ontwerp te valideren, werden twee monitoringsraaien geïnstalleerd ter plaatse van de Binnenwatersloot en de Kloksteeg. Dit waren de twee locaties waar men loodrecht op het eerste in uitvoering gaande compartiment de fysieke mogelijkheid had om het maaiveld te monitoren op zettingen. Dit werd vooral gedaan om de verhouding tussen theorie (de SRA-predictieberekeningen) en realiteit (de meetdata van de monitoringsraaien) te kunnen achterhalen. In FIGUUR 5.22 is het bovenaanzicht van de opbouw van de monitoringsraaien weergegeven.

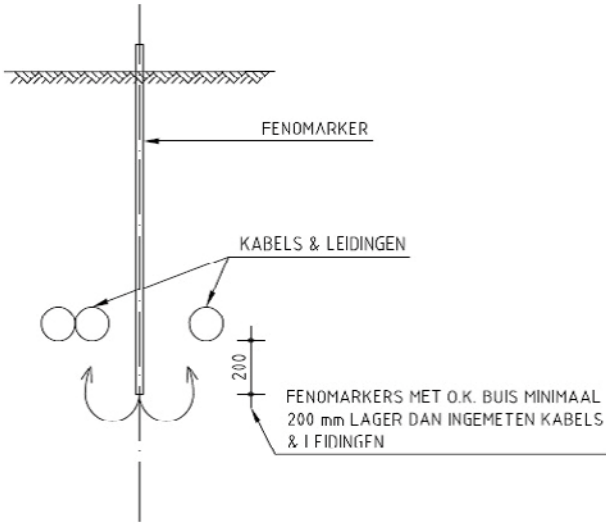


Figuur 5.22 / Bovenaanzicht opbouw van de monitoringsraaien.

Verticale deformaties met fenomarkers

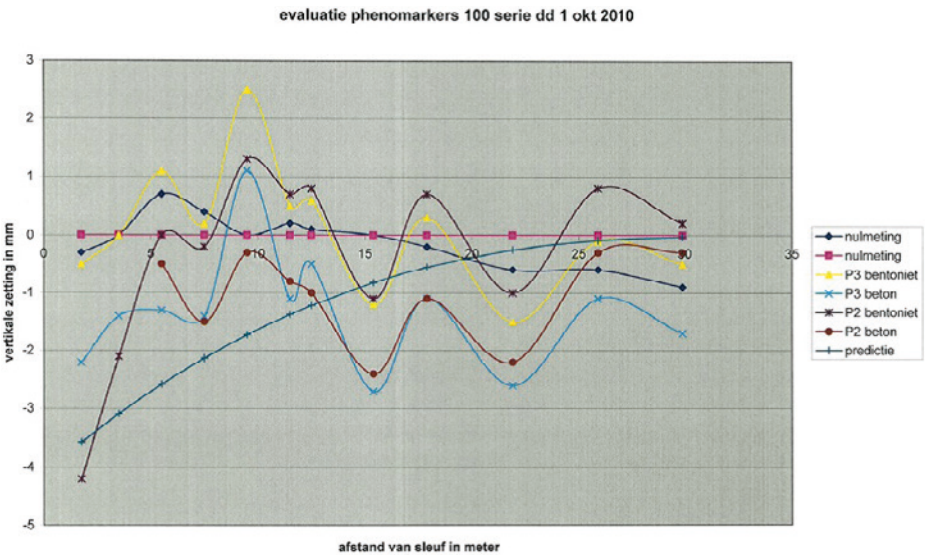
Om de maaiveldzettingen te kunnen monitoren, werden twee rijen van fenomarkers aangebracht over de lengte van de geprognotiseerde zettingstrog. Fenomarkers kunnen gemakkelijk aangebracht worden tussen de aanwezige kabels en leidingen, en nadat hun verankeringen zijn uitgeduwd, meten ze de zettingen ter plaatse van hun uitgeduwde verankeringen. Hierdoor ontwijkt men het scenario dat de grond boven de kabels en lei-

dingen op de kabels en leidingen zou blijven hangen terwijl er onder de kabels en leidingen een (iets) grotere zetting plaatsvindt. Het principe wordt weergegeven in FIGUUR 5.23.



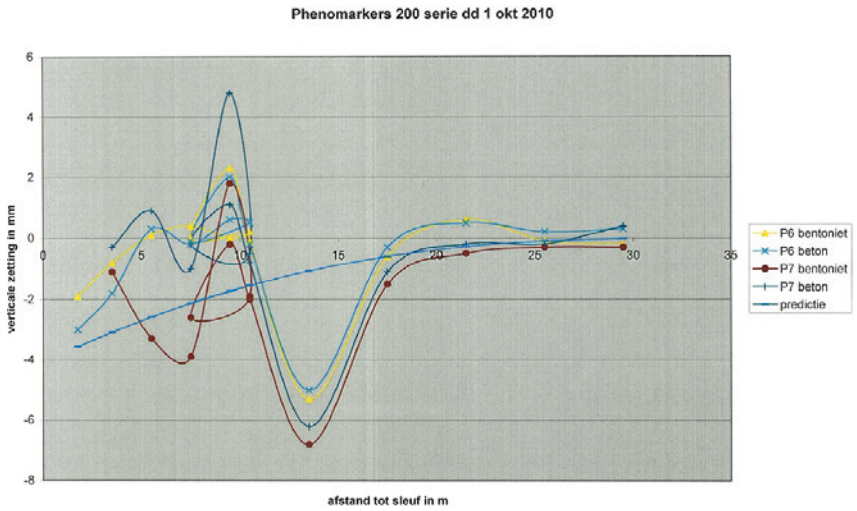
Figuur 5.23 / Fenomarkers bij kabels en leidingen.

De fenomarkers van de 100-serie meten de maaiveldzettingen in de raai van de Binnenwatersloot. Zoals in de FIGUUR 5.24 is te zien bij het vergelijken van de eerste en herhalingsnulmeting, is de meetruis circa +/- 1 millimeter, wat de meetruis van dezelfde ordegrootte maakt als de te meten deformaties tijdens het graven en betonneren van diepwandpanelen P2 en P3. Vergelijking met de geprognotiseerde deformatie geeft aan dat deze theoretische deformatie groter is dan die in realiteit optreedt.



Figuur 5.24 / Metingen fenomarkers 100-serie.

Voor de fenomarkers van de 200-serie ter plaatse van de Kloksteeg kan men (afgezien van de afwijkende meetwaarden van de fenomarker op een afstand van 13,50 meter uit de diepwand) besluiten dat de maaiveldzettingen tijdens het graven en betonneren van panelen P6 tot P8 de voorspelde curve min of meer volgen, maar steeds kleiner zijn dan voorspeld.

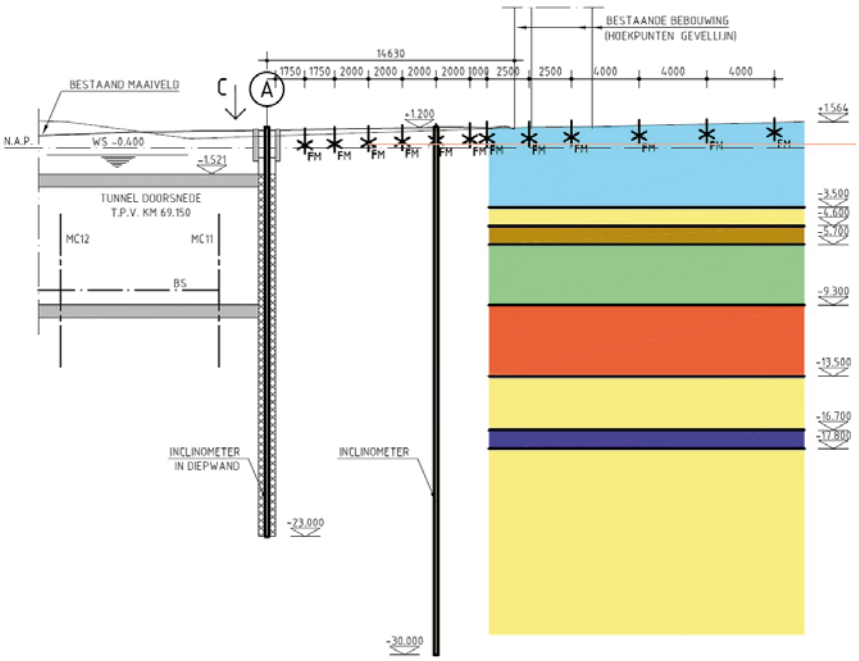


Figuur 5.25 / Metingen fenomarkers 200-serie.

Op basis van deze metingen werd besloten dat voor deze eerste uitvoeringsstappen de realiteit gunstiger was dan de theoretische voorspellingen, en er dus geen verdere aanscherping van gekozen mitigerende maatregelen in het vervolgproces nodig waren. Wel was het duidelijk geworden dat wanneer dergelijke kleine maaiveldzettingen accurater gemeten moeten worden, men naar meer geavanceerde methoden moet overstappen. Hierbij kan gedacht worden aan horizontale hellingsbuizen of SAAF's ('ShapeAccelArrayFields'). Ook de reflectorloze meting van het maaiveld zoals toegepast bij het boorgedeelte van de Noord/Zuidlijn blijkt achteraf gezien een goede oplossing te kunnen zijn.

Horizontale grondvervormingen met inclinometers

In beide monitoringsraaien werd een grondinclinometer voorzien op circa 3,50 meter uit de diepwand. Dit is ook te zien in FIGUUR 5.26, alsook in het bovenaanzicht in FIGUUR 5.27.



Figuur 5.26 / Monitoringsraaien met grondinclinometer.

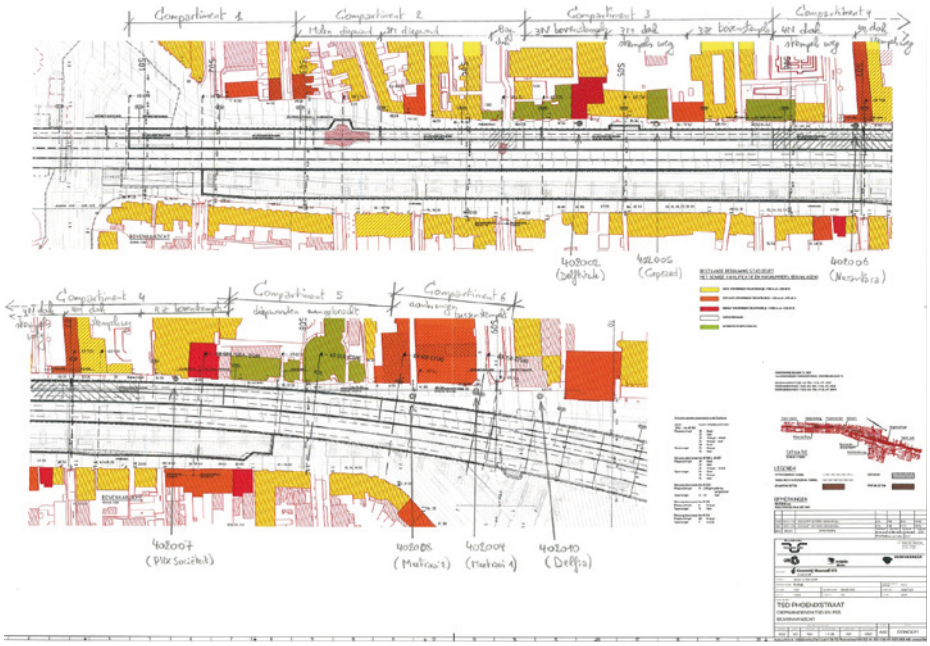
De metingen toonden in beide gevallen aan dat de inclinometer naar de tunnel toe bewoog wanneer het paneel ter hoogte van de inclinometer (P2 en P7) uitgegraven werd, terwijl de inclinometer naar de belendingen toe bewoog wanneer de bentoniet ingeruild werd door het beton. Exact het tegenovergestelde manifesteerde zich wanneer de naburige diepwandpanelen (P1 en P3 / P6 en P8) werden gerealiseerd.

Men zou deze laatste constatering kunnen toedichten aan het horizontale gronddruk-boogeffect, maar gezien de relatief kleine uitwijkingen tijdens elk van deze deelfasen, valt ook niet uit te sluiten dat men hier met de meetruis van inclinometers te maken heeft.

Er werd op basis van deze metingen in elk geval besloten dat de aanname in de berekeningen dat tijdens het betonneerproces de berekende horizontale deformatie van de bentonietfase (uitgravingsfase) voor de helft werd gereduceerd, een conservatieve aanname was en er dus geen aanscherping van de gekozen mitigerende maatregelen in het vervolgproces noodzakelijk waren.

5.4.3 Horizontale gronddeformaties met inclinometers

Lang het traject werden de inclinometers aangebracht volgens een welomlijnde strategie. Voor de Phoenixstraat en het Bolwerk waren de initieel aangebrachte grondinclinometers als volgt verdeeld (zie FIGUUR 5.27):



Figuur 5.27 / Verdeling grondinclinometers.

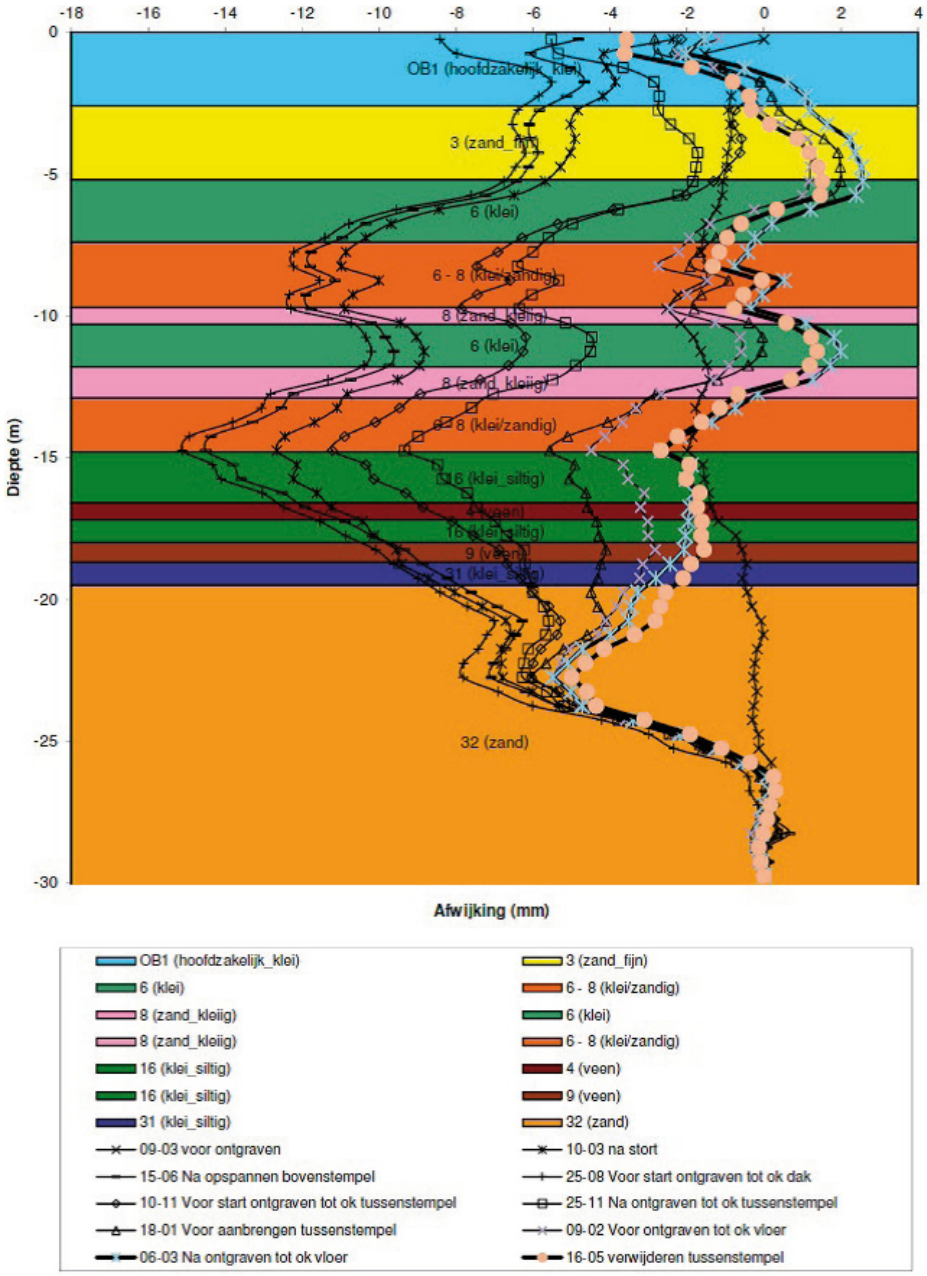
Inclinometers 402004 en 402008 maken deel uit van de monitoringsraaien ten behoeve van de validatie van het rekenmodel bij aanvang van de werkzaamheden. Inclinometers 402002, 402006, 402007 zijn geplaatst voor de 'rode' gebouwen van de Phoenixstraat. Ten slotte zijn inclinometers 402005 en 402010 aangebracht voor die gebouwen die volgens de archiefgegevens gefundeerd zijn op mortelschroefpalen. Aangezien deze palen (vermoedelijk) enkel kopwapening hebben, was hun standzekerheid enorm afhankelijk van de opgelegde vervormingen vanuit de grond. Tussen het bestaande stationsgebouw en het te realiseren ondergronds station werden ook nog drie inclinometers (702003 t/m 702005) aangebracht.

Na de ervaringen in de eerste fasen ter hoogte van de monitoringsraaien en tijdens het aanbrengen van de diepwanden voor het bestaande stationsgebouw, werd al snel duidelijk dat de metingen tijdens het ontgraven en betonneren van de naburige diepwandpanelen heel arbeids- en dus kostenintensief waren, terwijl er weinig meerwaarde was. Hetzelfde gold voor de metingen halverwege het graaf- en betonneerproces van het paneel ter hoogte van de inclinometers. Daarom werden deze meetsessies weggelaten.

Anderzijds had men ook geconstateerd dat er soms significante verschillen konden optreden tussen twee inclinometingen terwijl er geen bouwactiviteiten in de tussenliggende periode hadden plaatsgevonden. Om deze ruis zo veel mogelijk uit de meetdata te filteren, werd besloten om heel kort vóór en heel kort na elke activiteit de inclinometing door te voeren. Tevens werd vastgelegd dat een inclinometing een drievoudige inmeting van de A-positie en een drievoudige inmeting van de B-positie zou behelzen, waarbij de definitieve rapportage gegeven zou worden op basis van de gemiddelden van de drie metingen per as. Deze rapportage zou tevens inclusief en exclusief correctie inmeting inclinobuiskop zijn. Deze correctie gebeurde op basis van de onafhankelijke inmeting van de kop ten opzichte van een vast punt. Dit is van groot belang om inmetingen met behulp van inclinometers nauwkeurig te maken.

Voor eerste fase van de Phoenixstraat werden op onderstaande tijdstippen inclinometingen noodzakelijk geacht:
- Voor start ontgraven paneel.
- Na start ontgraven paneel.
- Voor inwisseling bentoniet door beton.
- Na inwisseling bentoniet door beton.
- Na het ontgraven tot onderkant bovenstempel.
- Na aanbrengen voorspankracht in drie meest naburige bovenstempels.
- Na ontgraven tot onderkant dakplaat.
- Na verharding dakplaat en wegnemen bovenstempels.
- Na ontgraving tot onderkant tussenstempels.
- Na aanbrengen voorspankracht in drie meest naburige tussenstempels.
- Na ontgraving tot onderkant vloer.
- Na weghalen tussenstempels (vindt plaats na voldoende verharding vloer).
- Eén week na bereiken stationair regime in naburige peilbuizen na afzetten bemaling.

Algemeen kan gesteld worden dat de inclinometers doorgaans goede informatie verschaffen als de horizontale deformaties een ordegrootte van circa 4 tot 5 millimeter hebben overschreden. Vóór die tijd maakt de meetruis het bijzonder moeilijk om harde conclusies te trekken uit de meetdata. In FIGUUR 5.28 wordt een typisch beeld gegeven van een inclinometer naast de diepwandtunnel van de Phoenixstraat. Alle deformaties bevinden zich in een range van amper 20 millimeter, wat aangeeft dat inclinometers in combinatie met buigstijve diepwandbouwputten minder lucratief zijn. In de andere hoofdstukken (over de andere projecten) blijkt dat inclinometers wel heel nuttige informatie geven in die gevallen waar de standzekerheid van naburige paalfunderingen in het gedrang kunnen komen of waar een bouwproces binnen een (minder buigstijve) bouwkuip met damwanden grotere horizontale deformaties in de grond genereert.



Figuur 5.28 / Inclinometer naast de diepwandtunnel van de Phoenixstraat.

5.4.4 Deformaties van gebouwen door middel van miniprisma's

Algemeen beeld eerste fase

De volcontinue monitoring van de miniprisma's was het cruciale element in de deformatieopvolging van alle belendingen. Zoals reeds gesteld, werden de contractuele verplichtingen voor de toelaatbare deformaties van de belendende gebouwen vertolkt door grenspolynomen per kwaliteitsklasse. Daar het programmeren van deze polynomen in het monitoringssysteem Argus dermate omslachtig tot schier onmogelijk geacht werd, was ervoor gekozen om voor elk gebouw de geprognotiseerde maximumwaarde van ε_h en ß te vertalen naar maximumwaarden van U_x en U_y. Deze waarden werden vervolgens als grenswaarden aangenomen, en de signaal- en interventiewaarden werden gelijkgesteld aan 75 en 90 procent van deze grenswaarden.

In FIGUUR 5.29 wordt voor fase 5c, die het einde van de eerste fase betekent, een overzicht gegeven van de initieel vastgelegde grenswaarden U_x en U_y per gebouwblok in de Phoenixstraat, alsook de daadwerkelijk gemeten deformaties (zie BIJLAGE A.2 voor een overzicht van grenswaarden in meer fasen). Aangezien er meerdere prisma's per gebouw(blok) zijn aangebracht, wordt er steeds een minimum- en maximumwaarde van de meetdata gegeven. De meetwaarden die hoger zijn dan de berekende grenswaarden in die fase met een gele kleur aangeduid.

		oostbuis gereed (5c)									
gebouw		ux;ontw	ux;min		ux;max		uy;ontw	uy;min		uy;max	
Wateringsevest 1-11	geel										
Wateringsevest 1-6	oranje	3.7	2.07	0.56	3.66	0.99	5.1	0.17	0.03	1.12	0.22
Dirklangendwarsstraat 44	oranje	5	3.67	0.73	7.51	1.50	6.5	0.26	0.04	2.01	0.31
Dirklangendwarsstraat 29	oranje	5	3.32	0.66	6.27	1.25	6.5	3.88	0.60	4.79	0.74
Dirklangenstraat 6	geel	12.7					16.1				
Phoenixstraat 110-108	geel	7.1	3.42	0.48	4.22	0.59	14.6	5.74	0.39	6.12	0.42
Phoenixstraat 106	geel	7.1	3.13	0.44	4.4	0.62	14.6	6.39	0.44	6.5	0.45
Phoenixstraat 104-102	geel	7.1	3.26	0.46	3.69	0.52	14.6	6.16	0.42	7.57	0.52
Phoenixstraat 100	oranje	7.1	4.08	0.57	4.25	0.60	14.6	7.65	0.52	7.72	0.53
Phoenixstraat 96	geel	7.1	4.68	0.66	6.18	0.87	14.6	7.7	0.53	9.48	0.65
Phoenixstraat 94-92	geel	7.1	6.5	0.92	7.68	1.08	14.6	7.18	0.49	9.18	0.63
Phoenixstraat 90-88	geel	7.1	4.6	0.65	6.26	0.88	14.6	7.14	0.49	9.23	0.63
Bagijnhof 2a	groen										
Phoenixstraat 86a	groen										
Phoenixstraat 68	rood	3.6	0.85	0.24	4.49	1.25	12.4	2.34	0.19	7.17	0.58
Phoenixstraat 66	geel	8.5	1.38	0.16	2.37	0.28	17.1	0.08	0.00	1.65	0.10
Phoenixstraat 64	geel	8.5	3.47	0.41	3.8	0.45	17.1	0.18	0.01	0.65	0.04
Phoenixstraat 62	groen										
Phoenixstraat 56	oranje	8.5	3.71	0.44	5.36	0.63	17.1	10.19	0.60	12.84	0.75
Phoenixstraat 54	oranje	8.5	4.17	0.49	5.31	0.62	17.1	11.48	0.67	13.17	0.77
Phoenixstraat 52	oranje	8.5	2.35	0.28	5.25	0.62	17.1	11.27	0.66	13.38	0.78
Phoenixstraat 50a	geel	0.4	1.87	4.68	3.6	9.00	10.3	10.28	1.00	11.96	1.16
Phoenixstraat 49	groen										
Phoenixstraat 41-48	geel	0.4	0.23	0.58	0.4	1.00	10.3	2.54	0.25	2.59	0.25
Sint Agathaplein 2-5	oranje	0.4	3.45	8.63	7.22	18.05	10.3	7.8	0.76	9.03	0.88
Phoenixstraat 32 links	geel	6.7	0.09	0.01	2.34	0.35	13.1	1.1	0.08	2.87	0.22
Phoenixstraat 32 rechts	geel	6.7	0.75	0.11	3.45	0.51	13.1	1.69	0.13	2.85	0.22
Phoenixstraat 30 links	geel	1.2	2.33	1.94	4.09	3.41	8.6	7.38	0.86	10.9	1.27
Phoenixstraat 30 rechts	rood	1.2	3.63	3.03	8.3	6.92	8.6	7.13	0.83	11.21	1.30
Phoenixstraat 28	groen	11.2					19				
Phoenixstraat 10-22	groen	11.2	1.12	0.10	2.47	0.22	19	0.52	0.03	1.2	0.06
Phoenixstraat 8	oranje	11.1	6.94	0.63	8.47	0.76	18.4	7.9	0.43	11.87	0.65
Phoenixstraat 6	oranje	11.1	4.05	0.36	8.21	0.74	18.4	8.23	0.45	12.26	0.67
Phoenixstraat 4c	oranje	4.5	10.62	2.36	11.13	2.47	8.7	9.55	1.10	13.59	1.56
Phoenixstraat 4a	oranje	6.8	6.87	1.01	9.12	1.34	9.4	9.38	1.00	10.17	1.08
Phoenixstraat 2	oranje	6.8	7.41	1.09	9.42	1.39	9.4	8.71	0.93	10.09	1.07
Binnenwatersloot 8	oranje	6.8	9.02	1.33	9.66	1.42	9.4	8.59	0.91	10.84	1.15

Figuur 5.29 / Initieel vastgelegde grenswaarden en gemeten waarden.

Toelichting op de tabel:

De waarden van $U_{x;ontw}$ en $U_{y;ontw}$ zijn de ontwerpwaarden volgens de theoretische ontwerpberekeningen. De waarden $U_{x;min}/U_{x;max}$ en $U_{y;min}$ / $U_{y;max}$ zijn de respectievelijke minimale en maximale meetwaarden voor U_x (horizontaal) en U_y (verticaal). De waarden in de tabellen zonder hoofding zijn de verhoudingen van ($U_{gementen}/U_{ontwerp}$).

Bij twaalf van de dertig gebouwblokken was er een overschrijding van de vooraf bepaalde grenswaarden. Toch heeft dit geen aanleiding gegeven tot een wijziging van de vooraf gekozen mitigerende maatregelen, noch heeft deze schijnbare overschrijding tot enige schade geleid. Reden is dat de grenswaarden aan de berekeningen waren gerelateerd en niet aan de restvervormingscapaciteit van de gebouwen zelf.

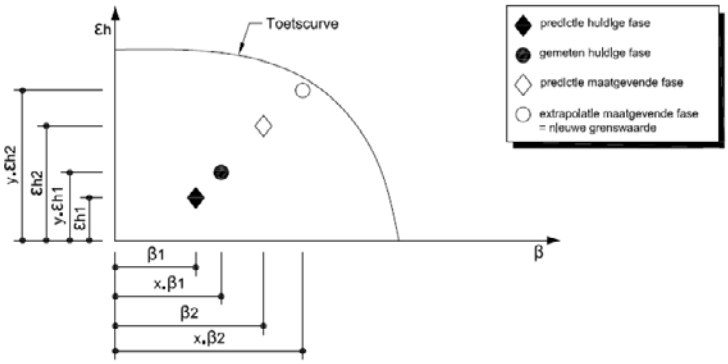
Werkproces bij overschrijding signaal-, interventie- en/of grenswaarden
Wanneer een signaalwaarde werd overschreden, werd hiervan automatisch melding gemaakt in Argus. Op dat moment werd binnen CCL meteen onderzocht of het hier om een realistisch meetresultaat ging of om een melding ten gevolge van storing.

Tijdens de eerste fase zijn er veel storingen opgetreden door de aanwezigheid van de graafmachines tussen total stations en de miniprisma's, en vooral ten gevolge van de aanwezigheid van de bovenleidingen van de tram tussen total stations en miniprisma's. Daar er tot veertien verschillende faseringen van de trambaan in het project doorgevoerd werden, was er geen rekening gehouden met de verschillende locaties van de bovenleiding tijdens de fasen waarin de hoogte van de miniprisma's en de locatie van de total stations zijn vastgelegd. Kleine aanpassingen gaven wel meteen goede resultaten, zodat het twijfelachtig is of een uitgebreide 3D-analyse bij aanvang van het project wel economisch voordeliger geweest zou zijn.

Bij plotseling significante wijzigingen in de meetdata van één miniprisma was de oorzaak meestal een vervormd prisma ten gevolge van een aanraking met een ander mobiel object, en moest een correctie in het werk doorgevoerd worden. Het kwam ook wel voor dat van meerdere prisma's per gebouw er slechts één prisma een overschrijding vertoonde. In dit geval werd er kritisch gekeken of de meetdata van dat ene prisma wel pasten bij de meetdata van de overige prisma's.

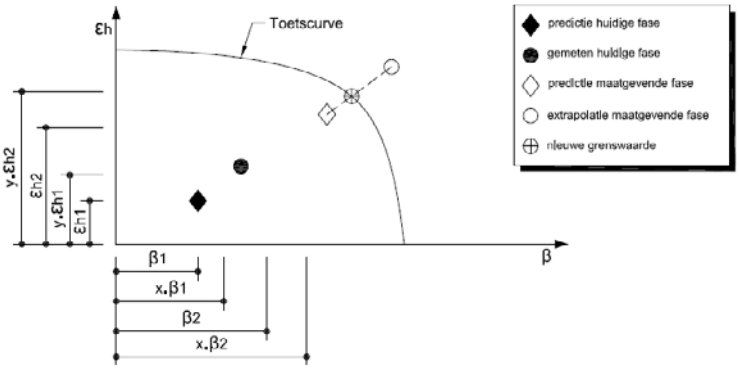
Bij realistische meetdata werd onderzocht waaraan de overschrijding te wijten kon zijn, en of de oorzaak weggenomen kon worden. Wanneer dat laatste niet ging, werd er uitgezocht hoe kritisch de ingestelde grenswaarden daadwerkelijk waren in relatie tot de contractuele eisen volgens de Boscardin en Cording polynomen per gebouwkleur. In vele gevallen was de theoretische grenswaarde dermate klein dat zelfs bij forse overschrijdingen het gebouw nog steeds voldeed aan de toetspolynomen. In deze gevallen werd door CCL een reset-memo opgesteld.

Reset-memo
Als eerste stap werd de gemeten toestand in de toetsgrafiek weergegeven. Vervolgens werd een prognose gemaakt van de eindtoestand of de meest kritieke fase, ervan uitgaand dat de theoretisch nog bijkomende deformaties zich zouden manifesteren volgens de verhouding van de gemeten deformatie tot de theoretische deformatie tijdens de huidige uitvoeringsstap. Indien volgens deze logica er nog geen overschrijding van de toetspolynoom zou optreden, werden de nieuwe geprognotiseerde maximumwaarden als grenswaarden in Argus ingevoerd.



Figuur 5.30 / Gemeten toestand in de toetsgrafiek.

Indien er volgens de bovenstaande logica wel een overschrijding van de toetspolynoom te verwachten viel, werd het theoretische snijpunt met de toetspolynoom bepaald. Dit snijpunt werd dan weer met de reeds eerder vermelde formules teruggerekend naar grenswaarden voor U_x en U_y en ingevoerd in Argus.



Figuur 5.31 / Gemeten toestand in de toetsgrafiek met nieuwe grenswaarde.

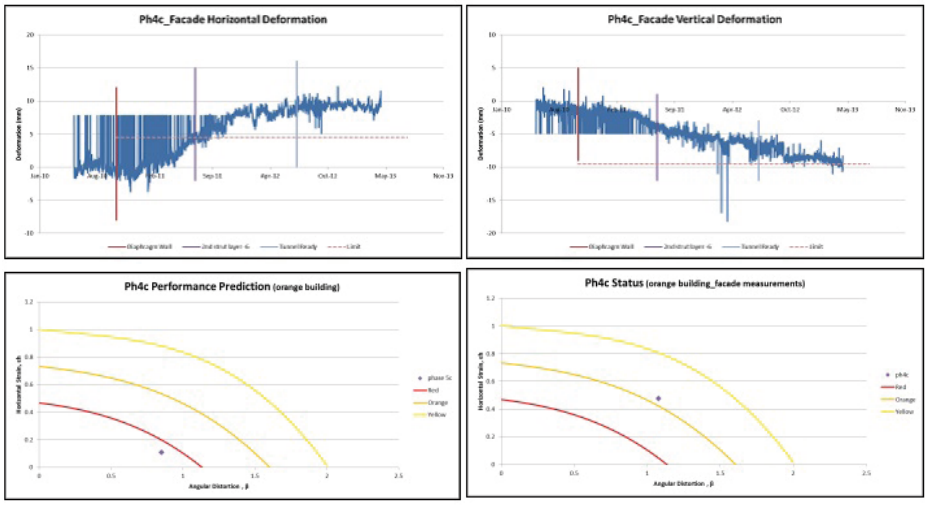
In dit laatste scenario werd vervolgens heel nauw opgevolgd of de conservatieve aannames (dat toekomstige deformaties zouden optreden volgens de huidige gemeten verhouding) daadwerkelijk voldoende conservatief waren en er geen overschrijding van de toetspolynoom te verwachten viel, dan wel of er nog een aanscherping van de gekozen mitigerende maatregelen nodig was.

Enkele voorbeelden uit de Phoenixstraat

In deze paragraaf worden drie voorbeelden uit de Phoenixstraat gegeven waarbij de geprognotiseerde waarden overschreden werden, maar er toch geen aanpassing in de uitvoering noodzakelijk was vanwege de aanwezige reserve tussen ingestelde (berekende) grenswaarden en de daadwerkelijke grenswaarden (waarden waarbij niet meer wordt voldaan aan de gestelde criteria).

Phoenixstraat 4c

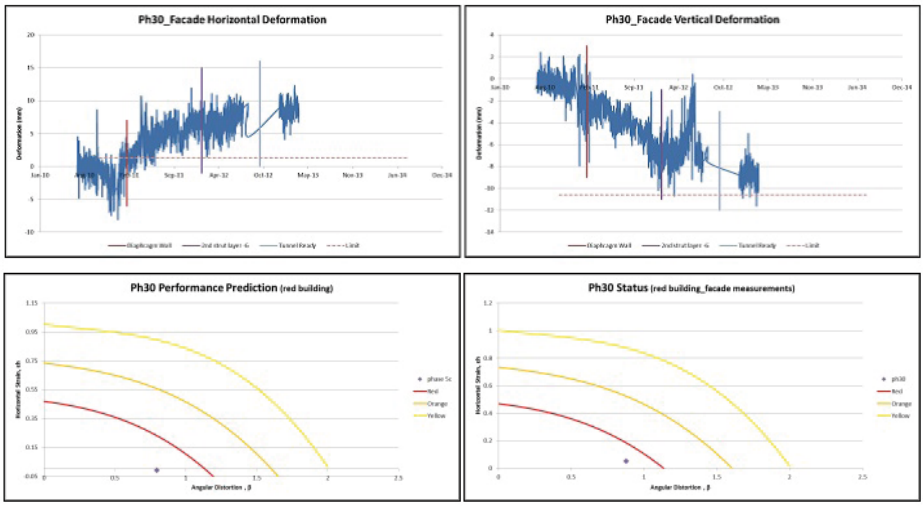
Het gebouw Phoenixstraat 4c was geclassificeerd als een oranje gebouw. De tijdens de eerste fase opgetreden horizontale vervormingen waren twee keer groter dan de geprognotiseerde waarden. Een intekening van de gemeten toestand in de toetsgrafiek gaf aan dat de situatie net buiten de toetspolynoom lag, maar geen enkele bijkomende schade werd opgetekend.



Figuur 5.32 / Deformaties Phoenixstraat 4c.

Phoenixstraat 30

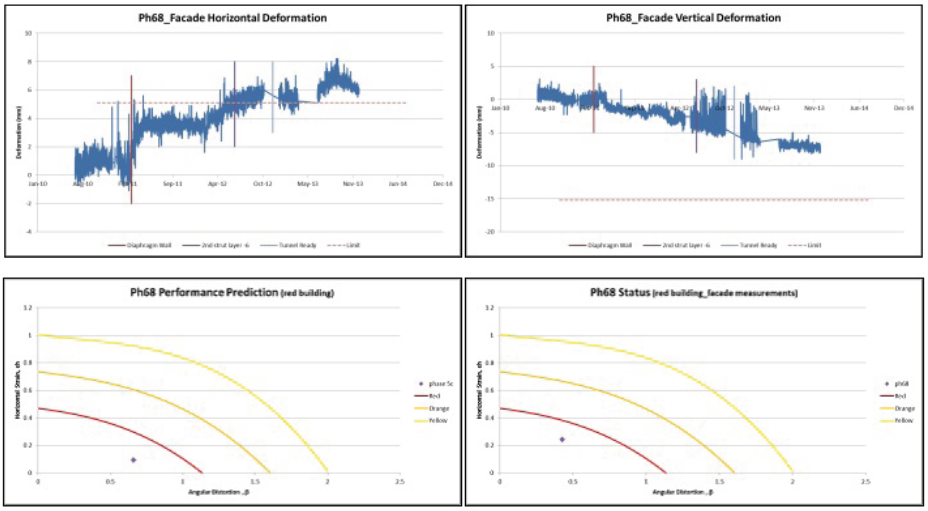
Het gebouw Phoenixstraat 30 was geclassificeerd als een rood gebouw. Ondanks het feit dat de opgetreden horizontale deformaties tot vijf keer groter waren dan de berekende waarde, gaf een intekening van de gemeten toestand in de toetsgrafiek aan dat de situatie nog steeds binnen de toetspolynoom lag. Ook hier werd geen enkele bijkomende schade opgetekend. De grote overschrijding dient enigszins genuanceerd te worden door te stellen dat de theoretische grenswaarde de heel kleine waarde van 1,4 millimeter had.



Figuur 5.33 / Deformaties Phoenixstraat 30.

Phoenixstraat 68

Het gebouw Phoenixstraat 68 was geclassificeerd als een rood gebouw. Ook bij dit gebouw werd een (lichte) overschrijding van de horizontale deformatie opgetekend. Een intekening van de gemeten toestand in de toetsgrafiek gaf aan dat de situatie nog steeds binnen de toetspolynoom lag. Ook hier werd geen enkele bijkomende schade opgetekend.

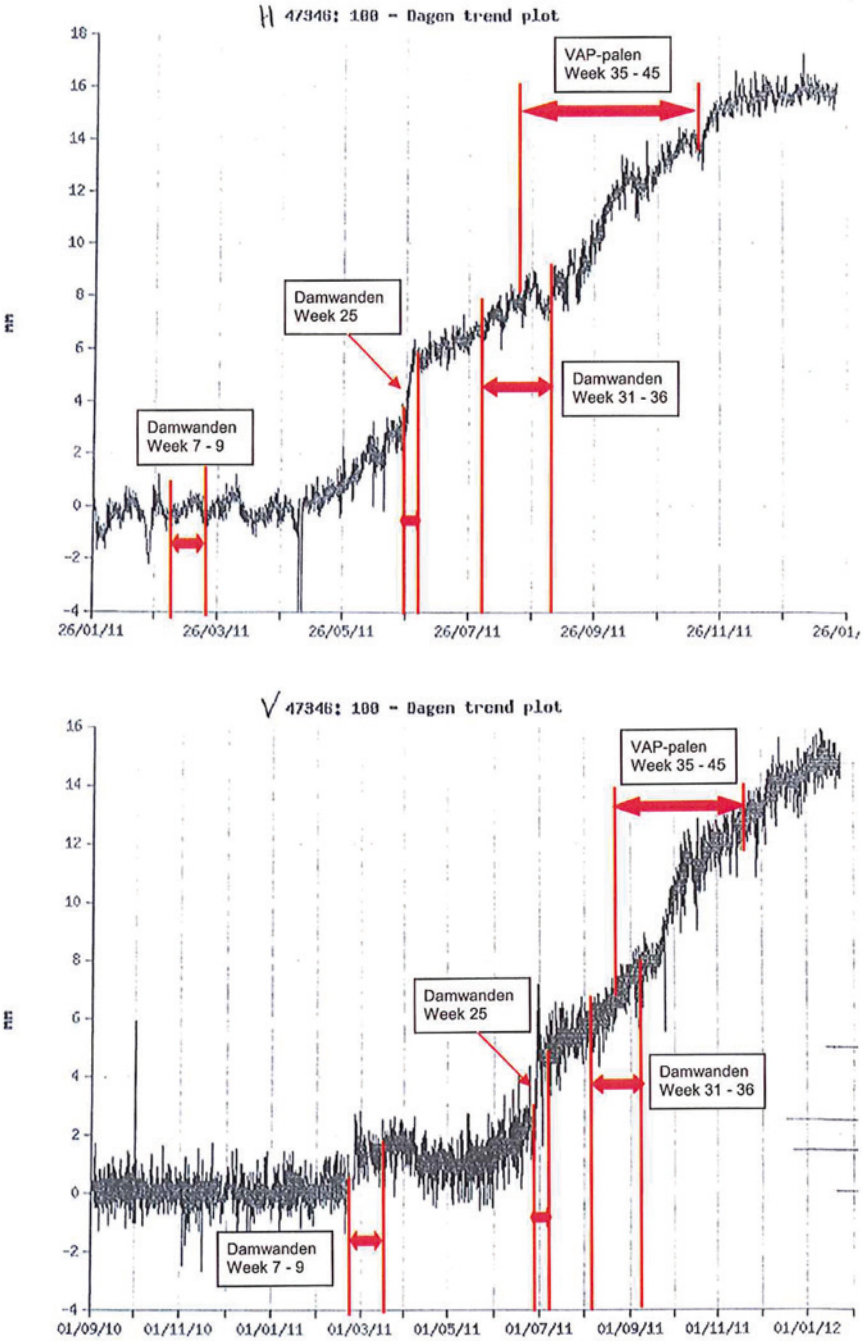


Figuur 5.34 / Deformaties Phoenixstraat 68.

Westvest 5a

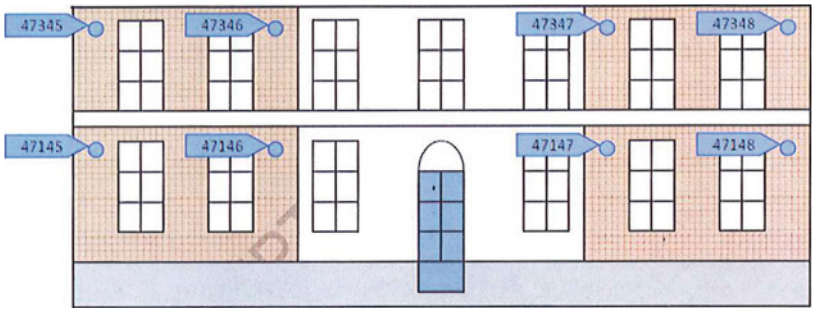
Tijdens werkzaamheden aan het compartiment Bolwerk zijn onverwachte vervormingen opgetreden aan belendende constructies, met name bij een aantal pijlers van het in gebruik zijnde spoorviaduct en het pand Westvest 5a. De opgetreden vervormingen zijn door het monitoringssysteem nauwkeurig geregistreerd.

Wanneer de monitoringsdata naast de historie van de uitgevoerde werkzaamheden worden gelegd, is een goede relatie te zien tussen een aantal werkzaamheden en de deformatie van Westvest 5a. In de FIGUUR 5.35 zijn de horizontale en verticale deformatiedata van de miniprisma's weergegeven.



Figuur 5.35 / Horizontale (boven) en verticale deformaties Westvest 5a.

Eind januari 2012 leken zowel de horizontale als verticale vervormingen te stabiliseren. Ondanks het feit dat er enkel damwanden en palen vanaf maaiveld waren aangebracht, waren deze deformaties reeds beduidend groter dan de geprognotiseerde deformaties die bij de maximale ontgraving slechts 7,1 millimeter (horizontaal) en 5,9 millimeter (verticaal) zouden bedragen. In FIGUUR 5.36 zijn de meetdata en de locatie van de miniprisma's op de voorgevel weergegeven.



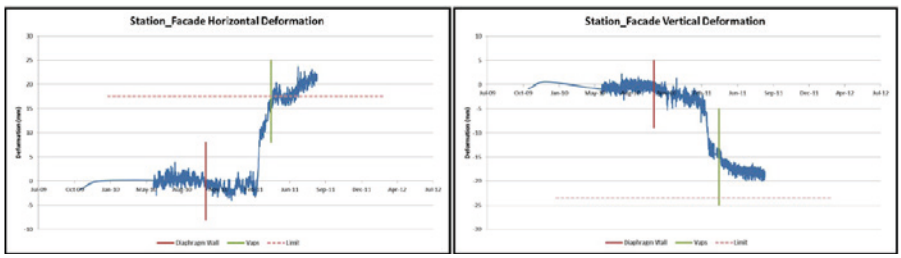
		Prismanummer							
activiteit	periode	H 47345	V 47345	H 47346	V 47346	H 47347	V 47347	H 47348	V 47348
DW links	wk 7-9 2011	0,00	1,50	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00
VAP's 1	wk 19-25 2011	3,00	1,50	2,75	1,00	2,50	1,00	2,00	1,10
DW HTM	eind wk 25	1,40	1,50	2,75	2,50	1,50	1,60	1,00	0,50
VAP's 2	wk 25 tot 16 nov 2011	4,40	9,50	10,00	9,50	4,00	6,60	1,70	4,50
	Totaal	8,80	14,00	15,50	14,50	8,00	9,20	4,70	6,10

Figuur 5.36 / Meetdata en de locatie van de miniprisma's op voorgevel Westvest 5a.

Men kan zich de vraag stellen hoe het mogelijk is dat men met een volcontinu draaiend en uitgebreid monitoringssysteem niet in staat is geweest om dergelijke overschrijdingen van de grenswaarden tijdig op te merken en afdoende mitigerende maatregelen te treffen. Hiervoor dient opgemerkt te worden dat zowel bij het aanbrengen van de 'damwanden week 25' als een bepaald deel van de 'VAP's[1] week 35-45', namelijk deze dichtbij het gebouw Westvest 5a, aanleiding hebben gegeven tot een zeer plotse en forse deformatietoename, gevolgd door een langdurige na-ijlperiode waarin deformaties bleven toenemen ondanks het feit dat er geen zettingsveroorzakende activiteiten plaatsvonden. Na de opgetreden deformaties ten gevolge van 'damwanden week 25' kon CCL met een resetmemo aantonen dat het gebouw nog reserve vervormingscapaciteit had. Dit kon helaas niet meer gesteld worden eind januari 2012. In BIJLAGE A.3 wordt verteld wat de vermoedelijke oorzaken van deze onvoorziene deformaties zijn geweest en hoe het vervolgproces van de uitvoering is doorgevoerd.

Het bestaande stationsgebouw

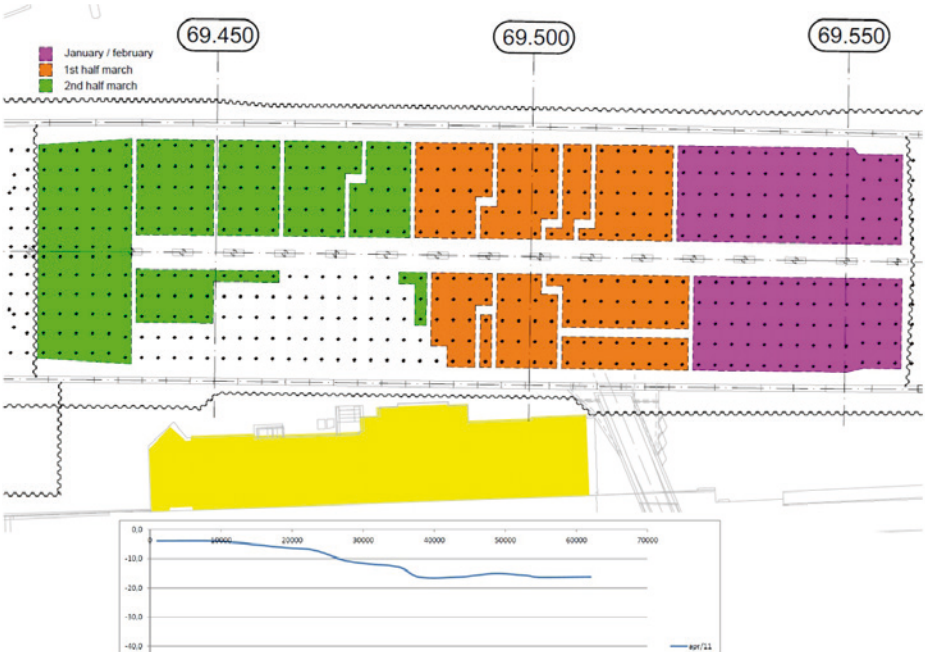
Ook tijdens werkzaamheden aan het ondergrondse station zijn onverwachte vervormingen opgetreden aan de enige belendende constructie, het bestaande stationsgebouw. De opgetreden vervormingen zijn door het monitoringssysteem nauwkeurig geregistreerd. In de FIGUUR 5.37 zijn respectievelijk de verticale en horizontale deformatiedata van de miniprisma's op de voorgevel van het gebouw weergegeven.



Figuur 5.37 / Horizontale (links) en verticale deformaties bestaande stationsgebouw.

1 VAP: Voton ankerpaal.

De werkzaamheden die gedurende deze periode zijn uitgevoerd, betroffen het aanbrengen van de diepwanden en de VAP's. Wanneer welke palen aangebracht zijn, is duidelijk weergegeven op FIGUUR 5.38. Tevens is het verloop van de zettingen langs de voorgevel in beeld gebracht.

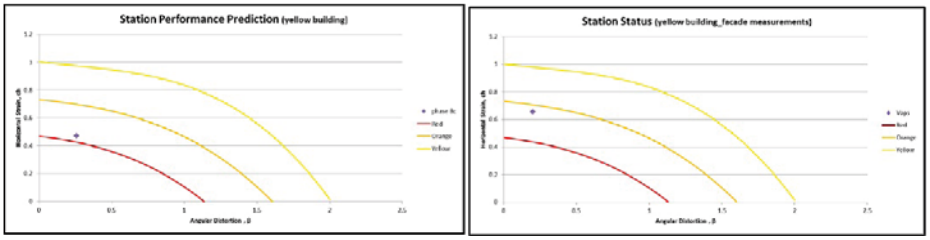


Figuur 5.38 / Aanbrengen palen en verloop van de zettingen langs de voorgevel.

Juli/augustus 2011 leken zowel de horizontale als verticale vervormingen te stabiliseren. Ondanks het feit dat er enkel diepwanden en palen vanaf maaiveld zijn aangebracht, waren deze deformaties al iets groter (horizontaal) of een beetje kleiner (verticaal) dan de geprognotiseerde deformaties die bij het einde werk circa 17,6 millimeter (horizontaal) en 23,5 millimeter (verticaal) zouden bedragen.

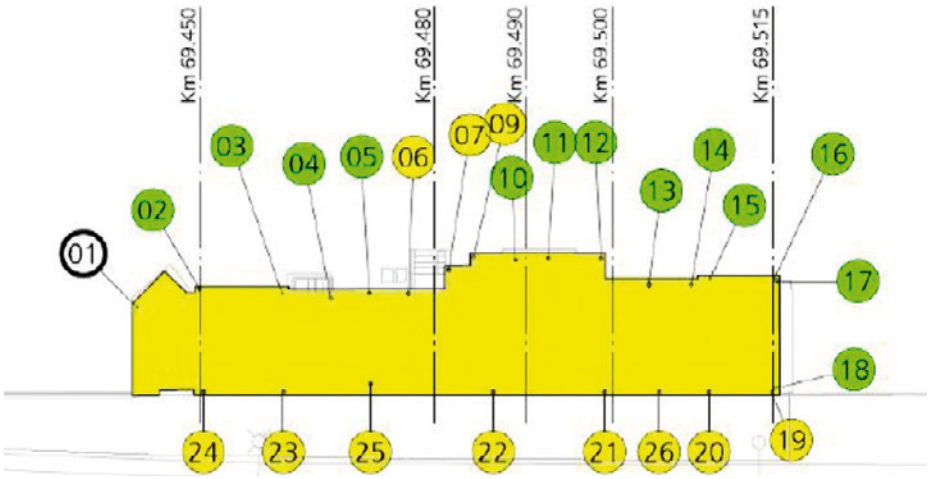
Men kan zich (weer) de vraag stellen hoe het mogelijk is dat men met een volcontinu draaiend en uitgebreid monitoringssysteem niet in staat is geweest om dergelijke overschrijdingen/benaderingen van de grenswaarden tijdig op te merken en afdoende mitigerende maatregelen te treffen. Hiervoor dient opgemerkt te worden dat het aanbrengen van de VAP's gedurende een heel korte periode in mei 2011 in de nabijheid van de zuidoostelijke hoek van het gebouw aanleiding heeft gegeven tot een zeer plotse en forse deformatietoename, gevolgd door een langdurige na-ijlperiode waarin deformaties bleven toenemen ondanks het feit dat er geen zettingsveroorzakende activiteiten plaatsvonden. Je kunt dus zeggen dat ondanks een uitgebreid monitoringssysteem men toch niet gevrijwaard blijft van snel optredende deformaties. Waar in andere gevallen de monitoring tijdig signalen doorgeeft om tijdig mitigerende maatregelen door te voeren, is men bij deze snel optredende deformaties veelal te laat.

Met een reset-memo kon aangetoond worden dat het als geel geclassificeerde gebouw nog reserve vervormingscapaciteit had.



Figuur 5.39 / Monitoring bestaande stationsgebouw.

Ondanks het feit dat prisma nummer 16 reeds forse horizontale deformaties vertoonde, kon men middels koppeling met de deformaties van prisma's 17 en 18 op de zuidelijke zijgevel aantonen dat het gebouw in zijn geheel een translatie- en rotatiebeweging maakte, waardoor vooral de horizontale rek veel minder kritisch was dan verwacht op basis van alleen de prisma's van de voorgevel. In FIGUUR 5.40 zijn de continu gemonitorde prisma's met een groene kleur weergegeven en de manueel gemonitorde prisma's met een gele kleur.



Figuur 5.40 / Continu (groen) en manueel (geel) gemonitorde prisma's.

In BIJLAGE A.4 wordt verteld wat de vermoedelijke oorzaken van deze onvoorziene deformaties zijn geweest en hoe het vervolgproces van de uitvoering is doorgevoerd.

5.4.5 Deformaties van het bestaand spoor met miniprisma's

Algemeen

De aanpak om het oostelijke spoor door middel van twee prisma's per dwarsligger om de circa 6 meter te monitoren, was voldoende effectief voor het op grondbedding liggende gedeelte. Nadelen van de locatie van de prisma's waren enerzijds de toch wel sterke vervuiling, waardoor de prisma's op regelmatige tijdstippen gereinigd moesten worden, en anderzijds de vele gevallen van beschadiging (lees: vervorming) van de prisma's tijdens onderhoudswerken van het spoor door derden.

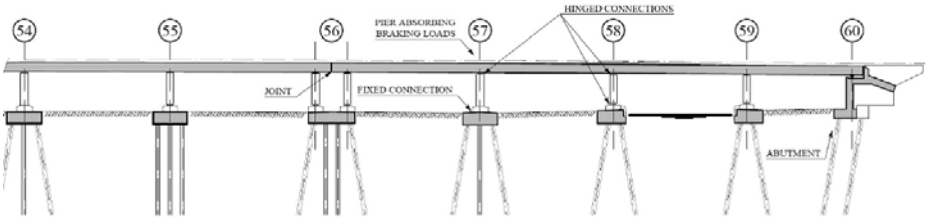
Voor de monitoring van het spoor op het viaduct werden initieel verkeerde conclusies getrokken, die uiteindelijk hebben geleid tot een situatie waarbij de treinsnelheid tijdelijk gereduceerd moest worden vanwege te grote vervorming van de spoorstaven.

Oorzaak opgetreden 'calamiteit'

CCL was ervan uitgegaan dat het plaatsen van prisma's elke 6 meter geen zin had op de geprefabriceerde dekken van het bestaande viaduct. Het volstond om prisma's aan te brengen net voor en net na elke dilatatievoeg, en dit aan beide zijden van het dek. Daar de dekplaten een lengte van circa 50 meter hadden, werd ook nog een raai van twee prisma's aangebracht in de middelste doorsnede van het brugdek (dus in totaal zes prisma's per brugdek). Aangezien de spoorstaven niet anders konden bewegen dan de dekken waarop ze vastgelijmd waren, werd gemeend dat de situatie voldoende onder controle was.

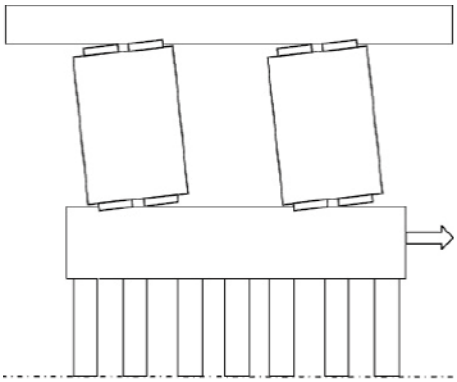
Echter, door het feit dat de prisma's aan beide zijden van een dilatatievoeg dermate dicht tegen elkaar stonden, was de ingestelde grenswaarde (die vertaald was van de 6 meter tussenafstand naar de daadwerkelijke tussenafstand van circa 1 meter) dermate klein dat zelfs de reguliere meetruis van het systeem reeds overschrijdingen van de grenswaarden vertoonden zonder enige activiteit op de bouwplaats. Derhalve werd de controle op schift 'uitgezet' in het monitoringssysteem. Achteraf gezien was monitoring van de spoorstaven om de 6 meter beter geweest om reeds snel geattendeerd te kunnen worden op enige deformatie.

Bovenstaande maatregel zou echter nog onvoldoende geweest kunnen zijn, omdat de opgetreden calamiteit vooral te wijten was aan het niet helemaal begrijpen van de structurele opbouw van het viaduct. Het viaduct is immers een opeenvolging van prefab dekdelen over meerdere steunpunten. Deze steunpunten zijn, op de rempijlers na, opgebouwd uit twee pendelkolommen op een onderheide funderingspoer per pijler. Ter plaatse van de dilatatievoegen is er steeds een dubbele rij pendelkolommen die op een gezamenlijke poer zijn gefundeerd.



Figuur 5.41 / Structurele opbouw van het viaduct.

Ten gevolge van de werkzaamheden aan bouwkuip Bolwerk, is de funderingspoer van (dubbele) pijler 56 gaan zakken/roteren. Het brugdek over pijlers 56 tot 60 naast de bouwkuip volgde deze deformatie, terwijl het brugdek over pijlers 52 tot 56 deze rotatie niet volgde. Hierdoor ontstond er een deformatie van de noordelijke (richting steunpunt 55) pendelkolommen van het steunpunt 56, zoals schematisch is weergegeven in FIGUUR 5.42.

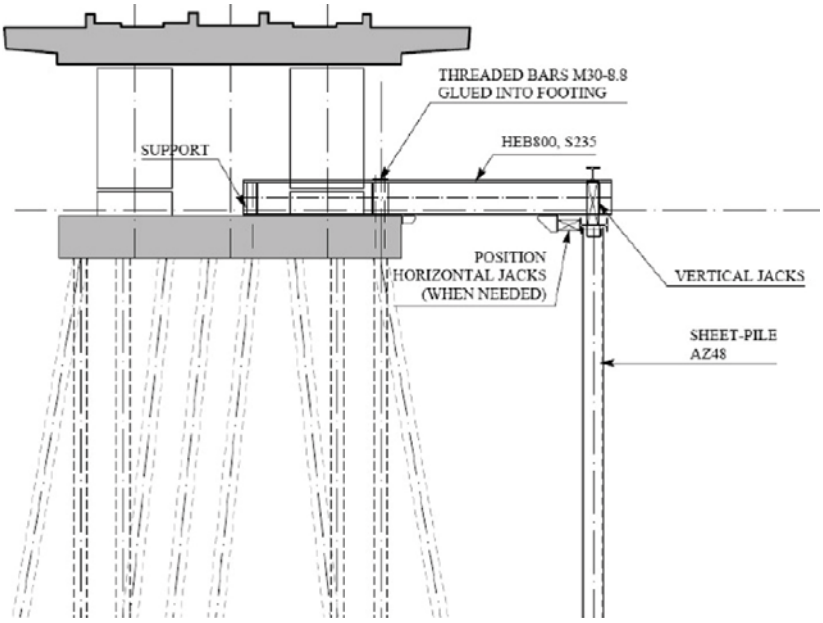


Figuur 5.42 / Deformatie van de noordelijke pendelkolommen van het steunpunt 56.

Deze deformatie was heel kritisch voor de standzekerheid van de bestaande dookverbindingen tussen brugdekken en pendelkolommen, alsook tussen pendelkolommen en poeren. Om verdere deformaties te voorkomen, werd de treinsnelheid (tijdelijk) beperkt, wat een gunstig effect had op de horizontale belasting vanuit het in de bocht liggende brugdek op de kolommen, en werden er tijdelijke verstevigingsconstructies aangebracht.

Door het plotselinge optreden van de calamiteit (tijdens het aanbrengen van damwanden naast fundering poer 56) kon CCL de situatie niet voldoende tijdig onderkennen en werden geen anticiperende mitigerende maatregelen getroffen.

Plan van aanpak vervolgproces
In een eerste stap werd er rekentechnisch nagegaan welke mitigerende maatregel er nodig was om de ingestelde snelheidsreductie van de passerende treinstellen weer te kunnen opheffen. Daarvoor werd een bijkomende fundering bedacht in de vorm van een gedeelte van de damwand van de bouwkuip.



Figuur 5.43 / Bijkomende fundering als mitigerende maatregel.

Vergelijkingen tussen de belastingen bij de huidige situatie met gereduceerde treinsnelheid zonder extra fundering en de normale treinsnelheid met extra fundering gaven aan dat de beperking opgeheven kon worden.

Vervolgens werd het bestaande viaduct met de huidige deformaties volledig structureel doorgerekend, waarbij er werd bepaald welke bijkomende deformaties tijdens het vervolgproces nog toelaatbaar waren. Dit resulteerde uiteindelijk in onderstaande criteria:
- Globale horizontale verplaatsing dwars op as spoor: 20 millimeter of minder.
- Globale verticale verplaatsing: 20 millimeter of minder.
- Verschilverplaatsing horizontaal en/of verticaal tussen twee opeenvolgende pijlers: 5 millimeter of minder.
- Verschilverplaatsing horizontaal en/of verticaal tussen twee opeenvolgende brugdekken (ter plaatse van dilatatievoegen): 5 millimeter of minder.

Een nieuwe eindige-elementenberekening van de vervolgstappen (Plaxis) toonde aan dat de beperking van de rijsnelheid kon worden opgeheven zonder bovenstaande criteria te overschrijden. Om echter afdoende back-upmaatregelen te hebben bij mogelijke

afwijkingen tussen rekenmodel en realiteit, werden tussen alle poeren en de bouwkuip (ter hoogte van het bovenste stempelraam) schorende stalen buizen aangebracht. Indien een ontoelaatbare horizontale deformatie van een poer te verwachten viel, kon men dan door middel van vijzels de poer terug dwingen naar zijn oorspronkelijke locatie. De haalbaarheid van deze mitigerende maatregel werd in het veld gevalideerd door een poer over 2 millimeter horizontaal te verplaatsen.

Monitoring vervolgproces
Om alle bewegingen van het viaduct nauwkeurig te kunnen volgen, werden bijkomende meetpunten aangebracht. Deze bestonden uit:
- Manueel in te meten prisma's aan beide zijden van elke funderingspoer (om de deformaties van de poer te monitoren).
- Manueel in te meten prisma's aan alle pendelkolommen (om deformaties kolommen te monitoren).
- Scheurwijdtemeters over de dilatatievoeg ter plaatse van pijler 56.
- Een rij 'stickers' ter plaatse van het stempelraam waartegen de schorende stalen buizen werden afgezet (om de deformaties van de damwand te monitoren).

Bovendien werd inclinometer 402011 geïnstalleerd om de bijkomende opgelegde vervormingen vanuit de grond op de funderingspalen van het viaduct te monitoren (zie BIJLAGE A.3.3).

Alle meetpunten werden heel intensief gemeten (tot meermaals per dag) gedurende de kritieke fasen. Hierbij werden signaal- en interventiewaarden gelijk aan respectievelijk 70 en 90 procent van de grenswaarden aangehouden. Het gehele vervolgproces werd daarna uitgevoerd zonder enige overschrijding van de interventiewaarden.

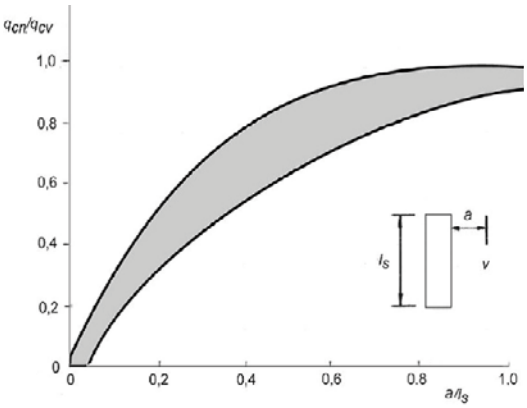
5.5 Optimalisaties monitoringsproces door voortschrijdend inzicht

Zowel bij de tussenfase als bij de tweede fase zijn aanpassingen aan het monitoringsplan doorgevoerd. Deze zijn gebaseerd op voortschrijdend inzicht tijdens de voorgaande fase(n) en werden steeds ter goedkeuring bij ProRail en bouw- en woningtoezicht ingediend voor implementatie.

5.5.1 Monitoring tussenfase Phoenixstraat

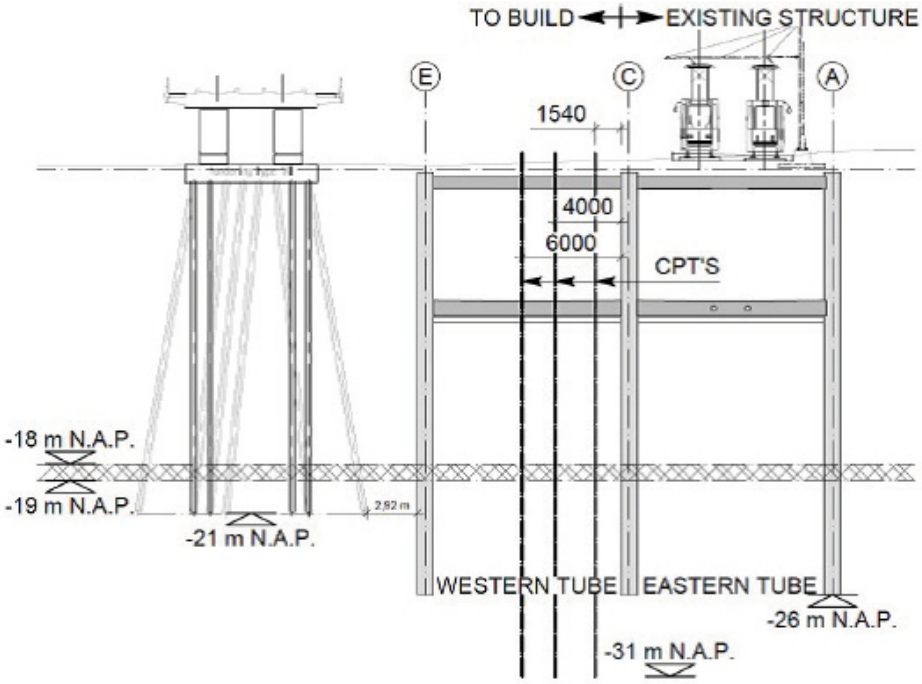
Risicobeheersing aanbrengen diepwanden naast spoorviaduct
Voorafgaand aan start werkzaamheden in de tussenfase werd onderzocht in hoeverre het aanbrengen van diepwandpanelen naast de (schoor staande) palen van het bestaande viaduct een verantwoord risico was.

Volgens algemeen aanvaarde literatuurbronnen zou de conusweerstand van de aanwezige grondslag in de nabijheid van geïnstalleerde diepwandpanelen afnemen in functie van de afstand tot het paneel en de breedte van het diepwandpaneel (zie FIGUUR 5.44).



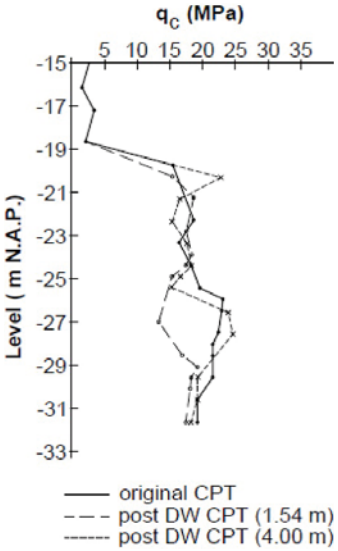
Figuur 5.44 / Conusweerstand in functie van de afstand en breedte diepwandpaneel.

Daar CCL beschikte over een groot aantal sonderingen die in het tunneltraject waren gemaakt voorafgaand aan alle werkzaamheden, kon men middels bijkomende sonderingen na het einde van de eerste fase de geldigheid van bovenstaande relatie in de Delftse situatie nagaan. Daarom werden op enkele dwarsdoorsneden, ter hoogte van bestaande oorspronkelijke sonderingen, nieuwe sonderingen gemaakt op circa 2, 4 en 6 meter uit de westelijke diepwand van de oostbuis die bestond uit 7,30 meter brede panelen. Het principe is weergegeven in FIGUUR 5.45.



Figuur 5.45 / Nieuwe sonderingen langs de oostbuis.

Wanneer de nieuwe en oorspronkelijke sonderingen met elkaar werden vergeleken, kon besloten worden dat de invloed van de diepwanden op de aanwezige grondslag eerder verwaarloosbaar was. Derhalve werd het niet nodig geacht om de diepwandpaneelbreedte naast de funderingspalen van het viaduct te beperken tot 3,80 meter, maar werd de voorziene paneelbreedte van 7,30 meter toegepast.



Figuur 5.46 / Vergelijking nieuwe en oorspronkelijke sonderingen.

Relaxatie continue monitoring gebouwen
De te monitoren belendende gebouwen/structuren zijn volgens het contract alle structuren die zich binnen het gebied bevinden waarin het maaiveld ten gevolge van de bouwwerkzaamheden meer dan 1 millimeter zou zakken.

CCL heeft twee contourlijnen gedefinieerd, namelijk de zettingscontourlijn en de risicocontourlijn. De zettingscontourlijn is die lijn waarop de voorgevel van een fictief 'rood' pand zich zou mogen bevinden en nog steeds aan de toetskromme van Boscardin en Cording zou voldoen wanneer de gehele uitvoeringscyclus werd doorgevoerd, waarbij verondersteld werd dat de aanwezige grondlagen hun karakteristieke verwachtingswaarden zouden hebben. De risicocontourlijn is hetzelfde, maar dan in het geval de geotechnische karakteristieken de ongunstige waarden (onder- dan wel bovengrenzen) zouden hebben.

Voor de uitvoering van de oostbuis waren de zettings- en riscocontourlijn respectievelijk op 16 en 25 meter uit de oostelijke diepwand gelegen, terwijl voor de westzijde deze respectievelijk op 18 en 25 meter uit de westelijke diepwand waren gelegen.

Bij de werkzaamheden gedurende de tussenfase, is de afstand tussen de voorgevels van de Phoenixstraat en de westbuis circa 16 meter, terwijl de afstand tussen de voorgevels van de Spoorsingel en de westbuis meer dan 25 meter bedraagt. Voortbordurend op de ervaringen bij de realisatie van de oostbuis, die er op duiden dat de scenario's met tegenvallende geotechnische omstandigheden niet aan de orde waren, heeft CCL besloten dat er zich geen panden in het invloedsgebied van de werkzaamheden bevonden die een continue monitoring nodig hadden.

Monitoring viaduct
Ervaringen met het viaduct ter hoogte van steunpunt 56 gaven aan dat het viaduct wel degelijk continu gemonitord diende te worden, zeker tijdens het aanbrengen van de diepwanden. Toen eenmaal alle diepwanden geïnstalleerd waren, kon deze continue monitoring wel afgebouwd worden, aangezien de uitgravingen van de tussenfase zich afspeelden in grondlagen die significant hoger gelegen zijn dan de lagen waaraan de palen van het viaduct hun draagkracht ontlenen.

Deze discontinue monitoring van belendingen en het viaduct (na aanbrengen diepwanden) vond plaats net na het beëindigen van discrete uitvoeringsfasen. Deze uitvoeringsfasen zijn:
- Ontgraven tot onderzijde dakplaat.
- Ontgraven tot onderzijde tussenstempels.
- Ontgraven tot onderzijde vloerplaat.
- Wegnemen tussenstempels.

Wanneer bij deze metingen resultaten werden verkregen die groter waren dan de voorspelde waarden, kon beslist worden om de monitoring te intensiveren.

Aangezien het vroegtijdig detecteren van een verschilvervorming tussen twee aansluitende dekken cruciaal was voor de beschikbaarheid van het spoor, werden verplaatsingssensoren aangebracht bij alle voegovergangen naast het werkgebied van de tussenfase. Deze sensoren maten de dwarsverplaatsing tussen twee dekken onderling met een zeer hoge nauwkeurigheid, terwijl meetfouten, of het niet kunnen meten ten gevolge van externe invloeden, nagenoeg volledig uitgesloten waren. De grenswaarden voor de maximale deformaties waren, conform het monitoringsplan, ingesteld op +/- 5 millimeter.
De sensoren werden voor start werkzaamheden aan de diepwanden geïnstalleerd om zodoende een nulwaarde (gemiddelde) te kunnen bepalen van de natuurlijke beweging van het viaduct als gevolg van temperatuurverschillen in dag en nacht.

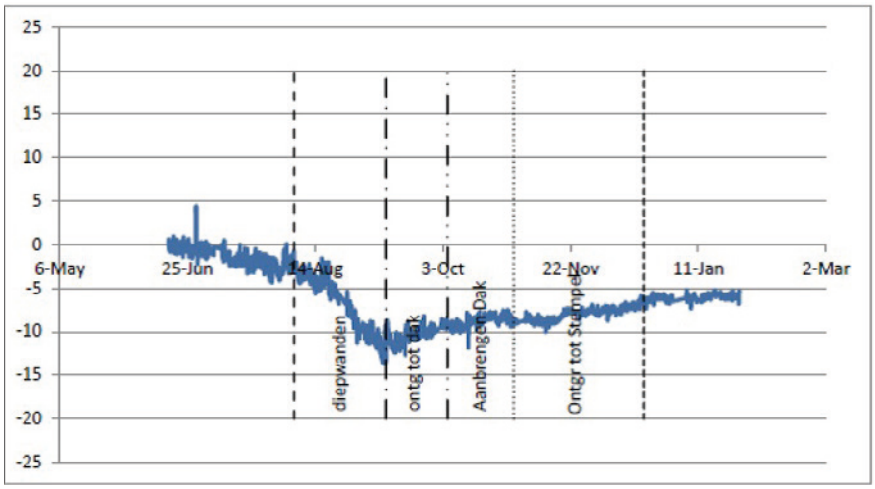
Figuur 5.47 / Verplaatsingssensoren aangebracht bij voegovergang.

De verplaatsingssensoren deden dienst als waarschuwers, maar de dekken, pijlers en poeren werden tevens voorzien van prisma's zoals eerder toegepast ter hoogte van het Bolwerk. Ook deze prisma's werden voorafgaand aan de werkzaamheden ingemeten. Bij constatatie van deformaties in de verplaatsingssensoren kon dan via inmeting van deze prisma's een volledig beeld van de vervorming verkregen worden.

Monitoringsresultaten

Wanneer men de grafieken in alle stramienen beschouwt, kan opgemerkt worden dat er in geen enkele dwarsraai helemaal geen zettingen zijn opgetreden, noch aan de (verafgelegen) panden, noch aan het op palen gefundeerde viaduct. Een lichte, zeer geleidelijk aangroeiende rijzing tot 2 millimeter van het viaduct en panden aan de Spoorsingel kan gezien worden in enkele dwarsraaien, maar hier is meer dan waarschijnlijk een seizoensgebonden invloed, dan wel een onnauwkeurigheid van het meetsysteem de oorzaak.

In horizontale richting kan men systematisch een verplaatsing zien verschijnen in de periode van het aanbrengen van de diepwanden. Deze verplaatsing is het meest uitgesproken voor het viaduct en bedraagt maximaal 10 tot 12 millimeter, waarna deze in de tijd weer afneemt tot maximaal 5 millimeter ten opzichte van de toestand voorafgaand aan de werkzaamheden. De verplaatsing is echter naar de Spoorsingel toe, dus weg van de diepwandsleuf. Het is onwaarschijnlijk dat de druk van de natte betonspecie zulke verplaatsingen, weg van de diepwandsleuf, zou genereren (toch blijkt dat dit fenomeen ook binnen de Noord/Zuidlijn is waargenomen), en bovendien kon men in de deformatiegrafieken ook zien dat de verplaatsingen al begonnen kort vóór het aanbrengen van de diepwanden.



Figuur 5.48 / Horizontale verplaatsing prisma's op dek, pijler en poer van eenzelfde steunpunt van het viaduct.

Wanneer men de horizontale verplaatsingen beschouwt voor de prisma's die op dek, pijler en poer van eenzelfde steunpunt van het viaduct zijn aangebracht, dan kan men een nagenoeg identiek verloop terugvinden. Dit duidt op een pure translatie van de gehele dwarsdoorsnede. Men kon deze horizontale verplaatsingen echter niet afdoen als banale meetruis binnen het monitoringssysteem, want nagenoeg dezelfde deformaties in relatie tot de uitvoeringswerkzaamheden zijn teruggevonden voor de verschillende gemonitorde dwarsraaien, terwijl het steeds om andere tijdsperioden ging. Tot nog toe is er geen duidelijke oorzaak voor dit fenomeen gevonden.

5.5.2 Monitoring tweede fase

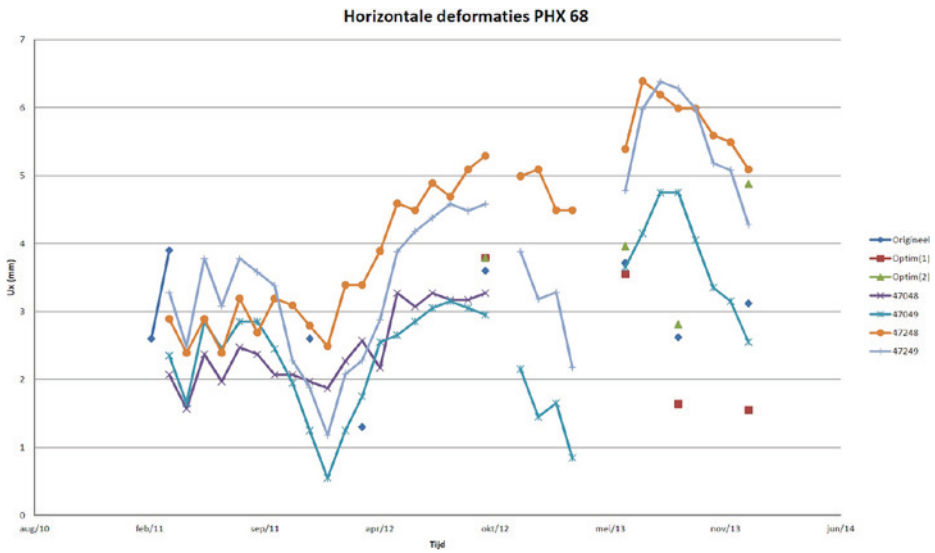
Monitoring gebouwen

Voorafgaand aan het uitbouwen van het monitoringssysteem voor de tweede fase had CCL een grondige analyse gemaakt van de geregistreerde deformaties tijdens de eerste fase en de tussenfase. Hoofdvragen in deze analyse waren:

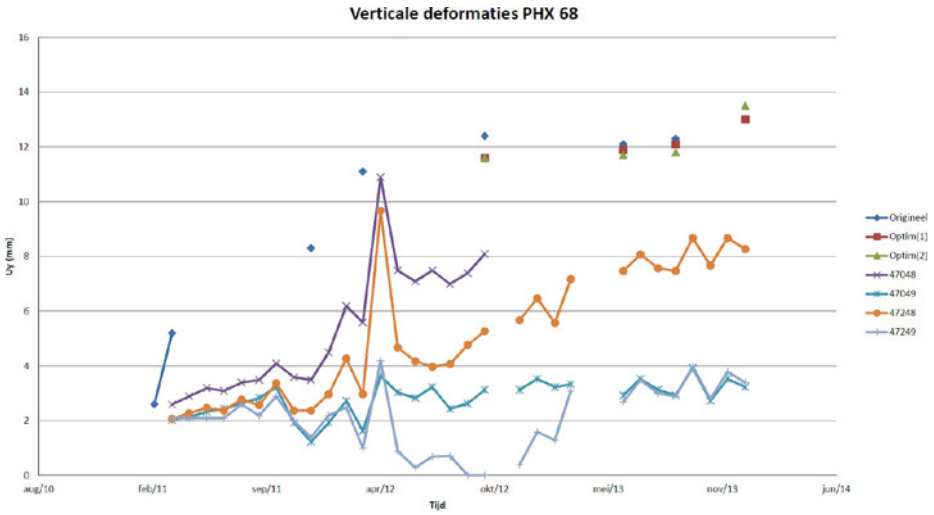
- Treden deformaties onwillekeurig in de tijd op, of zijn deze aan de werkzaamheden te koppelen?
- Is er sprake van significante na-ijleffecten in deformaties na beëindiging van zettingsgenererende activiteiten?
- Hoe verhouden de gemeten deformaties zich ten opzichte van de voorspelde deformaties?
- Om deze analyse te maken, werd het 'rode' pand Phoenixstraat 68 gekozen als studieobject. Op de voorgevel van dit gebouw werden destijds vier prisma's aangebracht. Prisma's 47048 en 47049 bevonden zich op circa 3 meter boven het maaiveld, terwijl prisma's 47248 en 47249 zich op circa 6 meter boven het maaiveld bevonden.

De grafieken in FIGUUR 5.49 en FIGUUR 5.50 tonen de meetwaarden van de horizontale en verticale deformaties van de vier prisma's, alsook de voorspelde waarden. Voor deze voorspelde waarden worden vanaf de start van de tussenfase steeds drie scenario's gegeven:

- Het originele uitvoeringsscenario, met in de westbuis ingeklemde vloer- en dakplaten en het toepassen van bovenstempels en voorgespannen tussenstempels.
- Het eerste optimalisatiescenario, met in de westbuis scharnierende vloer- en dakplaten, geen bovenstempels, maar wel nog voorgespannen tussenstempels.
- Het tweede optimalisatiescenario, met in de westbuis scharnierende vloer- en dakplaten, geen bovenstempels en niet-voorgespannen tussenstempels.



Figuur 5.49 / Meetwaarden en voorspelde waarden van horizontale deformaties Phoenixstraat 68.



Figuur 5.50 / Meetwaarden en voorspelde waarden van verticale deformaties Phoenixstraat 68.

Het laatste scenario is ook daadwerkelijk toegepast, aangezien de voorspelde waarden nergens tot ontoelaatbare combinaties van β en ε_h leidden, noch in de uitvoeringsstappen van de tussenfase, noch in de vervolgstappen in de tweede fase.

In horizontale richting ziet men dat in de periode februari 2011 tot maart 2012 de metingen vrij goed aansluiten op de voorspellingen. In de periode maart 2012 tot oktober 2012 vertonen de hoge prisma's een grotere deformatie dan de voorspellingen, wat verklaard kan worden door het effect van rotatie van de voorgevel ten gevolge van een kantelbeweging van het gehele gebouw. De voorspelde waarden zijn immers teruggerekend naar verwachte deformaties op het niveau van 3 meter boven het maaiveld. Vervolgens zijn er twee perioden waarin de continue monitoring werd stopgezet. Na de tweede onderbrekingsperiode blijken de horizontale deformaties allemaal significant groter te zijn dan net voor die onderbreking, en dit ondanks het feit dat er in die periode geen enkele zettingsveroorzakende activiteit heeft plaatsgevonden.

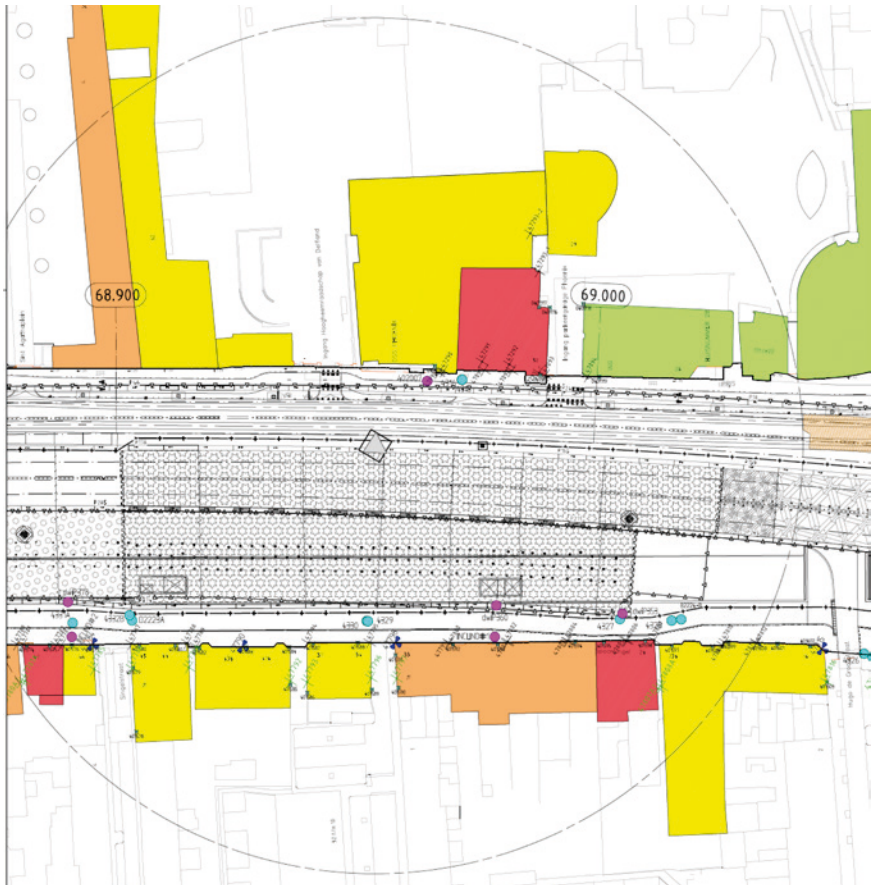
In verticale richting ziet men reeds vanaf de eerste meetwaarden dat de gemeten waarden fors achterblijven ten opzichte van de voorspelde waarden. In de maandelijkse monitoringsrapportage van april 2012 werd er gesproken van abnormaal grote deformaties ten gevolge van obstakels in de zichtlijnen van de total stations. Dit is duidelijk terug te vinden in de pieken in FIGUUR 5.50, die naderhand verdwijnen. Aan het einde van de monitoringsperiode zijn de gemeten waarden slechts circa 60 procent van de voorspelde waarden. Ook kan men zien dat de significante toenames steeds te correleren zijn met zettingsgevoelige activiteiten, waarna de deformaties weer 'stilvallen'.

Omdat de horizontale deformaties veel kleiner (minder dan de helft) in absolute waarde zijn dan de verticale deformaties, geven deze doorgaans geen aanleiding tot het overschrijden van de voorgeschreven toetspolynomen; zeker niet in het geval dat ze gecombineerd worden met verticale deformaties die behoorlijk kleiner zijn dan de voorspelde waarden.

Omdat bovendien de verticale deformaties goed de voorspelde tendenzen volgden, was het dan ook geoorloofd om in de tweede fase de volcontinue monitoring van de gebouwen te vervangen door manuele inmeting van de prisma's op vooraf vastgelegde discrete momenten in de uitvoering en/of op minimale tijdsintervallen (bijvoorbeeld maandelijks). Op deze wijze dacht men nog steeds voldoende snel attent gemaakt te worden op afwijkend gedrag, waarna men desgewenst de monitoring op die specifieke locatie kon intensiveren. De vooraf vastgelegde discrete momenten waren:

- Voor aanvang werkzaamheden tweede fase (nulmeting).
- Na aanbrengen diepwanden voor het specifieke pand in kwestie.
- Na ontgraven tot onderkant dek.
- Na ontgraven tot onderkant tussenstempels.
- Na ontgraven tot volledige diepte.
- Na weghalen tussenstempels.
- Einde werkzaamheden.

Tijdens de uitvoering van de tweede fase kwam men er echter vrij snel achter dat het meten van de prisma's op discrete tijdstippen toch een zeker gevoel van 'blind sturen' genereerde. Men had immers geen idee of de meetwaarde een gemiddelde waarde of een maximale of minimale piekwaarde voorstelde. Daarentegen kon men bij een continue monitoring steeds de tendens waarnemen. Wanneer de (discrete) meetwaarde ver genoeg van de voorspelde waarde op dat tijdstip lag, kon men deze methode handhaven, maar in het andere geval gaf dit al gauw aanleiding tot hermetingen. Bij de meest kritische gebouwen van compartiment 5 werd zelfs besloten om weer over te schakelen naar een volcontinue monitoring met robotic total station.

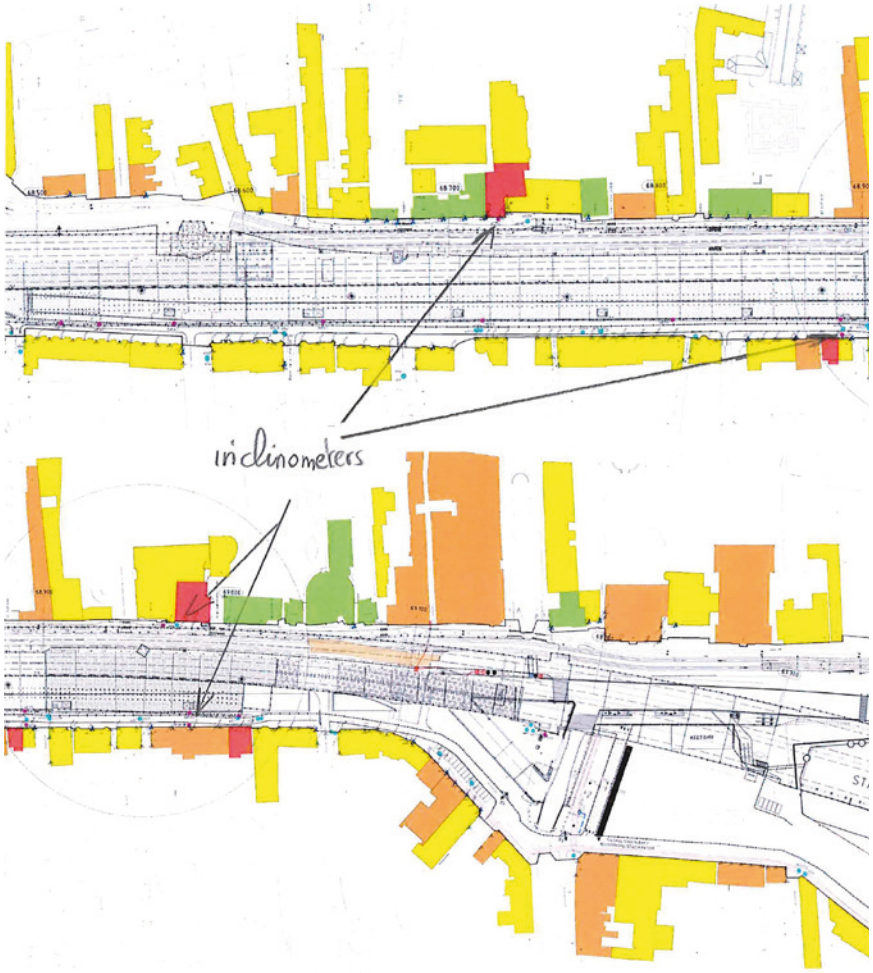


Figuur 5.51 / Compartiment 5 van het projectgebied.

Voor de tweede fase werd ook vastgehouden aan de meerwaarde van meetbouten als back-up in het geval de prisma's beschadigd zouden worden. Ook het toepassen van hoge en lage prisma's op de meer gevoelige 'rode' en 'oranje' panden werd nog steeds doorgevoerd. Tot slot werden er ook prisma's achteraan elke beschikbare zijgevel aangebracht, omdat deze prisma's perfect het monoliet gedrag van gebouwen (translatie en/of kantelen)

konden onderbouwen als dit zou optreden. Het in de eerste fase aangehaalde bezwaar dat deze prisma's onzichtbaar zouden zijn voor de destijds vast opgestelde total stations, ging voor de tweede fase niet meer op vanwege de manuele inmeting van de prisma's.

Langs de Spoorsingel werden ook drie grondinclinometers ingeplant, waarbij telkens in dezelfde dwarsdoorsnede ook de voorzieningen voor inclinometingen in de westelijke diepwand van de parkeergarage Spoorsingel werden aangebracht. Een eerste 'inclinoraai' werd voorzien aan het begin van het uitvoeringsproces om na te gaan of de bottom-upuitvoering van de Spoorsingel andere resultaten gaf dan de top-downuitvoering van de oost- en westbuis. De overig twee inclinoraaien werden voorzien aan de gevoelige 'rode' en 'oranje' panden aan de Spoorsingel.



Figuur 5.52 / Grondinclinometers langs de Spoorsingel.

Monitoring van het bestaande (nieuwe) spoor

De doelstelling van de monitoring van het bestaande spoor was tweevoudig. Enerzijds diende de monitoring vroegtijdig te signaleren dat er ten gevolge van de werkzaamheden vervormingen aan het bestaande spoor optraden, die zonder het doorvoeren van mitigerende maatregelen zouden kunnen leiden tot overschrijding van de grenswaarden van de vervormingen van het spoor. Anderzijds konden de monitoringsdata ook aangewend worden wanneer er discussie zou ontstaan bij in het werk geconstateerde vervormingen aan het spoor, waarbij het niet meteen duidelijk was of deze aan de werkzaamheden CCL, dan wel aan iets anders toe te dichten waren.

Uitgangspunten
Voorafgaand aan de werkzaamheden werd er een volledige nulmeting van de ligging van het bestaande spoor doorgevoerd. Deze diende als basis wanneer men naar aanleiding van een discussie, achteraf een herhalingsmeting had gemaakt.

CCL meende op basis van ervaringen uit de eerste fase en tussenfase te kunnen stellen dat er geen grote vervormingsverschillen (de plotse 'knikken' in het spoor) te verwachten waren in het diepwandgedeelte van de Phoenixstraat vanwege het ongedilateerde monoliete gedrag van de oostbuis. Zodoende was de kans op ontoelaatbare vervormingen ten gevolge van de werkzaamheden eerder klein.

De kans op dergelijke plotse vervormingsverschillen was (veel) groter ter plaatse van de overgangen met de in bouwkuip geformeerde tunneldelen en ter plaatse van compartimenteringsgrenzen tussen twee delen waar een in de tijd variërende uitvoering werd doorgevoerd. Hier werden dan ook voorzieningen getroffen om deze verschilvervormingen continu te meten met soortgelijke meetsensoren als degene die toegepast waren ter plaatse van de brugdekvoegen van het viaduct tijdens de tussenfase.

Aangezien het niet mogelijk was om in de in gebruik zijnde buis frequente metingen door te voeren, wilde CCL de monitoring van het bestaande spoor linken aan metingen van de diepwand tussen oost- en westbuis. De voorgestelde werkwijze wordt toegelicht in de volgende paragraaf.

Monitoring bestaand spoor Phoenixstraat
Voor het gedeelte dat het eerst uitgevoerd zou worden in de tweede fase, werden uit het Plaxis-model alle vervormingen uitgelezen van de diepwand tussen oost- en westbuis op de zes locaties waar men prisma's had voorzien, en voor die uitvoeringsfasen waarin men metingen ging verrichten. Deze theoretische vervormingen waren een graadmeter tijdens de verschillende uitvoeringsstappen.

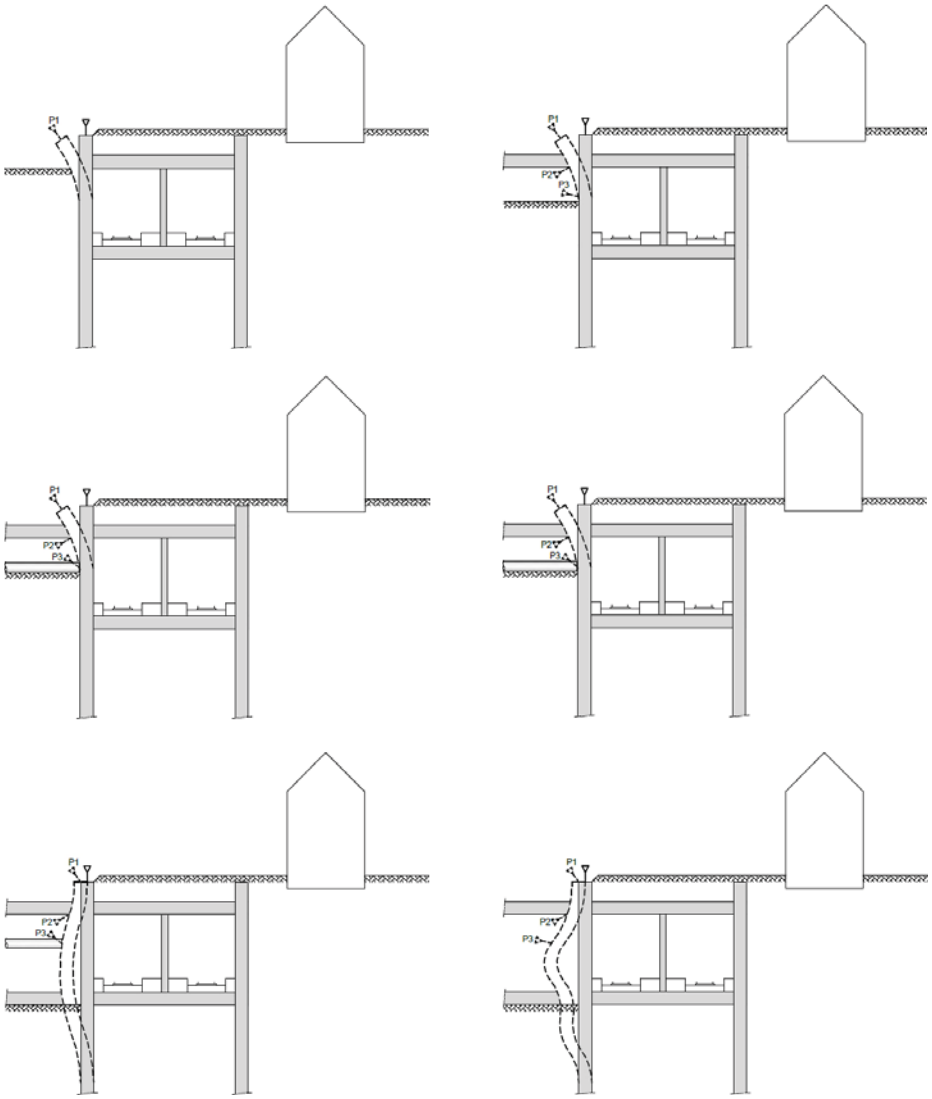
Vervolgens werd buiten in het werk de kop van de diepwand tussen west- en oostbuis vrijgemaakt en werden er prisma's P1 bevestigd die voldoende beschermd werden tegen de omgeving. De inmeting van de prisma's P1 was gelinkt aan de nulmeting van het bestaande spoor.

Wanneer vervolgens de uitgraving in de westbuis werd uitgevoerd tot de onderkant van het te storten dak, bewoog de diepwandkop, en dus de prisma's P1, naar het westen. Er werd buiten een inmeting gedaan van de prima's P1 na ontgraving tot de onderkant van het dak en deze meetresultaten werden vergeleken met uitleesdata van het Plaxis-model.

Nadat het dak was gestort en verhard, kon de ontgraving onderdaks plaatsvinden. In de eerste ontgravingsslag werd de grond weggehaald tot het niveau onder de te plaatsen tussenstempel. Wanneer dit ontgravingsniveau was bereikt, werden de prisma's P1 ingemeten en met de theoretische data vergeleken. Tevens werden de prisma's P2 (net onder de dakplaat) en P3 (in het hart van de stempellaag en tussen/naast de nog te plaatsen stempels) aangebracht en ingemeten. Deze prisma's P2 en P3 staan in dezelfde verticale stramien als de P1-prisma's (zie FIGUUR 5.53).

Nadien werden de stempels voorgespannen. Na het beëindigen van het voorspannen van alle stempels in het gemonitorde compartiment, werden alle prima's P1 tot en met P3 weer ingelezen en getoetst aan theoretische data.

Na het voorspannen van de stempels werd de uitgraving vervolgd tot het niveau van de onderkant van de tunnelvloer. Wanneer men dit niveau had bereikt, werden weer alle prisma's P1 tot en met P3 ingemeten en vergeleken met de theoretische waarden.



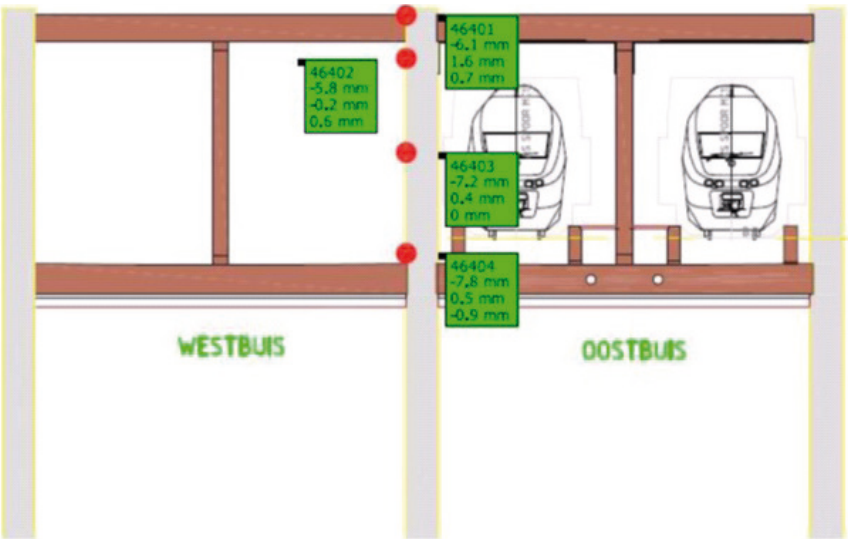
Figuur 5.53 / Bevestiging van prisma's P1, P2 en P3.

Tot slot werd de tunnelvloer gestort, en werden de stempels verwijderd. Op het moment dat alle stempels uit het gemonitorde compartiment waren weggehaald, werden alle prisma's P1 tot en met P3 nogmaals ingemeten en vergeleken met de theoretische waarden.

Als de meetresultaten significant groter waren dan de theoretisch verwachte deformaties, diende de situatie nader onderzocht te worden. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat meetwaarden ter grootte van de traditionele meetruis van de gebruikte meetapparatuur in combinatie met theoretisch heel kleine vervormingen niet onmiddellijk als 'significant groter' beschouwd dienden te worden en daarom nog geen aanleiding gaven tot een diepgaand onderzoek naar mogelijke oorzaken.

In die tunneldelen waar een tussenfase was uitgevoerd, kon men de prisma's P2 en P3 vanaf het begin van de uitvoering van de tweede fase aanbrengen en inmeten. In het werk moet gecontroleerd worden of men de prisma's P1 nog kan aanbrengen. Tevens is het hier aan te bevelen om nog een extra rij prisma's, P4, aan te brengen net boven de vloer van de westbuis.

Wanneer alle hiervoor beschreven werkzaamheden zijn afgerond, is het aan te bevelen om een nieuwe inmeting van het bestaand spoor door te voeren om zodoende vast te leggen hoe CCL het bestaande spoor heeft 'achtergelaten' (as-builtdossier). In FIGUUR 5.54 zijn de inmetingen weergegeven van een monitoringsraai in de in gebruik zijnde oostbuis. Het eerste cijfer betreft het nummer van het prisma, waarna de verplaatsingen in horizontale en verticale richting worden aangegeven. Uiteindelijk bleek dat de tunnel een vrij uniforme horizontale translatie over de volledige hoogte van de doorsnede weergaf van ordegrootte 6 tot 8 millimeter. De verticale verplaatsingen waren verwaarloosbaar klein.



Figuur 5.54 / Inmetingen van een monitoringsraai in de in gebruik zijnde oostbuis.

Monitoring bestaand spoor in tunneldelen gerealiseerd in tijdelijke bouwkuipen
Hier werd weer een onderscheid gemaakt tussen de gesloten tunneldelen en de open toeritbakken.

Gesloten tunneldelen
Met het oog op de vervormingen van het spoor, was het gewenst de verplaatsing van de vloer te kunnen meten. De verplaatsing van de vloer was echter alleen aan de binnenzijde van de tunnel te meten. In verband met het in exploitatie zijnde spoor was het niet mogelijk hier handmatig te meten. Daarom werd automatisch het verplaatsingsverschil ter plaatse van de kritische voegen gemeten. Kritische voegen zijn voegen tussen gebieden waarin een verschillende bouwfasering/planning werd toegepast. In deze gevallen komen aan weerszijden van de voeg verschillen in ontgravingsniveau voor, waardoor verschillen in horizontale verplaatsing van de moten loodrecht op de tunnel/het spoor zouden kunnen ontstaan.

Aanvullend werden bij iedere moot de twee westelijke hoeken van de bovenzijde van het dek van de gereed zijnde oostbuis ingemeten op discrete vooraf bepaalde tijdstippen:
- De nulmeting.
- Na het trekken van de damplanken van het tussenscherm tussen oostelijke en westelijke bouwkuip.
- Na het aanbrengen van de palen.
- Na ontgraving tot niveau net onder het aan te brengen tweede stempelframe.
- Na ontgraving tot maximale diepte.
- Na verwijderen tweede stempelframe.
- Na verwijderen eerste stempelframe (indien van toepassing).
- Na trekken van damwanden westelijke bouwkuip.

Open toeritbakken
Er werden geen noemenswaardige verplaatsingen van de oostelijke helft van de toerit verwacht tijdens de uitvoering van de westelijke helft. De reden hiervoor was dat aan de grondkering aan de oostzijde een op zichzelf staande damwand stond (verankerd of vrijstaand), dus zonder afstempeling naar de tussendamwand. Ook de vloer van de eerste fase was niet aangewend als steun voor de grondkering aan de oostzijde. Derhalve zou de (oostelijke) damwand tijdens de uitvoering van de tweede fase dan ook niet de neiging hebben de vloer te belasten en te verplaatsen.

Desondanks werd iedere moot van de toeritten ingemeten ter plaatse van de twee westelijke hoeken van de bovenkant van de vloerplaat op discrete tijdstippen:
- Een nulmeting.
- Na het ontgraven tot maximale diepte.
- Na het trekken van de tussendamwand.
- Na het aanbrengen van de palen.
- Na het trekken van de damwanden van de westelijke bouwkuip.

5.6 Conclusie

Op het moment van het verschijnen van dit rapport zijn de uitgravingen van de tweede fase voor nagenoeg alle compartimenten tot op het diepste punt gevorderd. De deformaties die hiermee gepaard gingen, waren in verticale richting onder de voorspelde waarden uit de berekeningen. Sommige horizontale verplaatsingen waren groter dan deze die in de berekeningen waren voorspeld, maar bleven nog steeds binnen de contractueel vastgelegde grenzen van de toelaatbare vervormingen.

6 A2 Maastricht

6.1 Inleiding

6.1.1 De Groene Loper

In 2011 is in Maastricht gestart met het plan de Groene Loper, dat zorgt voor een goede bereikbaarheid van Maastricht, doorstroming op de A2 en nieuwe kansen voor de ontwikkeling van de aangrenzende buurten door betere verkeersveiligheid en stedelijke vernieuwing van Maastricht-Oost. De Groene Loper omvat onder meer vervanging van de bestaande A2 door Maastricht door een 2,3 kilometer lange dubbeldekstunnel.

6.1.2 De tunnel

De A2-tunnel wordt gebouwd door Avenue2, een projectorganisatie bestaande uit aannemersbedrijven Strukton en Ballast Nedam, die in het leven is geroepen om de integrale gebiedsontwikkeling A2 Maastricht te realiseren.

De in-situ te storten betonnen tunnel is gerealiseerd binnen een droge bouwput van 30 meter breed en 16 meter diep. Voor de kerende wanden van de bouwput zijn voor het overgrote deel in cement-bentonietsleuf afgehangen stalen damwanden gebruikt, ondersteund door stempelramen.

Het project A2 Maastricht is in veel opzichten een pilotproject. Met diverse zaken is in dit project specifieke en veelal nieuwe ervaring opgedaan. Genoemd kunnen worden:

- De samenwerking aan de kant van de opdrachtgever. Financiële middelen en kennis van de vier betrokken partijen Rijkswaterstaat, de gemeenten Maastricht en Meersen en de provincie Limburg zijn samengebracht in één projectorganisatie, wat heeft geleid tot een goed samenwerkende organisatie waarin diverse organisatieculturen met elkaar zijn verenigd en waar op bepaalde terreinen expertise is ingehuurd.
- De aanbestedingsvorm, namelijk een concurrentiegerichte dialoog, die zeer bijzonder was voor die tijd.
- De integraliteit van het project. Gebruik van de ondergrond voor de weg levert de bovengrondse ruimte op om op lange termijn een duurzame ontwikkeling mogelijk te maken van de buurten in dit stadsdeel.
- De nauwe samenwerking na gunning. Er is kennis uitgewisseld tussen opdrachtgever en opdrachtnemer, hetgeen gelet op de complexe problematiek in de onder- en bovengrond in het compacte Maastricht van groot belang was. Voor de opbouw van een goed risicodossier vereiste deze vorm van aanbesteding vooraf meer conditionerend vooronderzoek en omgevingscommunicatie van de opdrachtgever.
- De ondergrond in Maastricht, die vanwege de aanwezigheid van kalksteen beter met die van Parijs is te vergelijken dan met die van Apeldoorn of Amsterdam. Omdat met die grondslag bij aanvang van het project, medio 2002, in Nederland weinig bouwervaring voorhanden was, moest een bijbehorende gestructureerde aanpak ontwikkeld worden om geotechnische risico's te beheersen in relatie tot de kansen die het gebruik van deze bodem destijds leek te bieden.

In voorliggende publicatie wordt specifieker ingegaan op een aantal leerpunten en ervaringen die vooral samenhangen met de aanleg van de A2-tunnel, een belangrijk projectonderdeel, in combinatie met de bijzondere grondopbouw. Deze leerpunten en ervaringen zijn:

- De geologie en de gehanteerde wijze van gegevens verzamelen.
- De toegepaste grondonderzoekstechnieken.
- De observational method, die in dit project is toegepast vanwege onzekerheid in de ondergrond die niet volledig kon worden weggenomen door het uitvoeren van grondonderzoek.
- De wijze van monitoring die is toegepast tijdens de observational method.

Opgemerkt wordt dat de opgedane ervaringen uiteraard met name waarde hebben in vergelijkbare grondomstandigheden, maar dat de ervaring opgedaan met de observational method breder toepasbaar is.

Een uitgebreide geologische omschrijving van de grondopbouw is opgenomen in BIJLAGE B.1.

6.2 Voorbereiding

6.2.1 Grondwater: invloed van de Maas

De Maas is een van de belangrijkste bepalende factoren voor de grondwaterstand in het projectgebied van de A2. De Maas draineert het eerste en het tweede watervoerende pakket in Maastricht. Het eerste watervoerende pakket bestaat uit een pleistocene grindlaag met direct daaronder het tweede watervoerende pakket van kalksteen. Om de scheepvaart te bevorderen, heeft Rijkswaterstaat in de jaren twintig van de twintigste eeuw het Maaspeil enkele meters verhoogd door de aanleg van stuw Borgharen. Bij de stuw is het verval ruim 4 meter. Doordat de Maas het achterland draineert, stroomt het grondwater in noordwestelijke richting door het A2-projectgebied. Tijdens een extreme hoogwatersituatie op de Maas wordt de stuw bij Borgharen gestreken en verdwijnt het extreme verval op die locatie. De richting van de grondwaterstroming draait dan richting west.

De Maas is een regenrivier die binnen een tot twee dagen extreem kan pieken en bij een piek die eens in de 250 jaar voorkomt, het terrein nabij de bouwkuip kan inunderen en de grondwaterstand direct fors doet stijgen. Rijkswaterstaat kan deze waterstanden echter voorspellen op basis van neerslaggegevens en peilmetingen stroomopwaarts in België en Frankrijk. Met Rijkswaterstaat is de afspraak gemaakt om waarschuwingen voor oplopende peilen doorlopend door te sturen naar de verantwoordelijken van het A2-project, zodat kon worden geschakeld met de retourbemaling en in een extreem geval tijdig bekend zou zijn dat de put zou kunnen vollopen. Dit laatste zou optreden bij een Maaspeil met een herhalingstijd van eens in de 1250 jaar. Achteraf is het peil van de Maas gedurende de gehele bouwperiode niet extreem hoog geweest. Overigens is de tunnel zodanig ontworpen dat hij droog blijft in een '1250-jaar', rekening houdend met de klimaatverandering verwacht voor het jaar 2050.

6.2.2 Waterwinningen

De Waterleidingmaatschappij Limburg (WML) onttrekt jaarlijks 12.000.000 kubieke meter water aan de kalksteen, hetgeen een grondwaterstandsverlaging van circa 50 centimeter ter plaatse van de tunnel veroorzaakt. Indien de WML een van de winningen door een milieuincident zou hebben moeten afschakelen, zou dat tijdens de bouw van de tunnel tot gevolg hebben gehad dat hier circa 15 tot 30 procent meer bemalen zou moeten worden. Met die (niet-opgetreden) calamiteit is in het bemalingsplan rekening gehouden.

Samen met de stuw in de Maas zorgt de grondwaterwinning tevens voor een vervlakking van het verhang van het grondwater in Oost-Maastricht.

6.2.3 Opstuwingsrisico door de tunnel

De natuurlijke grondwaterstroming zou kunnen worden belemmerd doordat de doorlatende grindlaag wordt doorsneden door de aangelegde tunnel, met opstuwing van het grondwater aan de stroomopwaarts gelegen zijde van de tunnel tot gevolg. De effecten van deze mogelijke opstuwing zijn bestudeerd door diverse toekomstscenario's voor de situatie na aanleg van de tunnel door te rekenen, waarbij tevens rekening is gehouden met eventuele toekomstige uitschakeling van de grondwaterwinning in Oost-Maastricht. Ook de mogelijke gevolgen van een veranderende grondwaterstand voor de omgeving en omliggende constructies zoals funderingen en kelders zijn hierbij in beschouwing genomen.

Op basis van de resultaten van deze beschouwingen zijn compenserende maatregelen in de vorm van onder de tunnel aangebrachte sifons gedimensioneerd en meegenomen in het ontwerp.

Figuur 6.1 / Onder de tunnel aangebrachte sifons.

Uit de evaluatie achteraf, nu anderhalf jaar na de stopzetting van de tunnelbemaling, blijkt dat het verschil in grondwaterstand direct aan de oost- en westzijde van de tunnel vrijwel gelijk is gebleven aan de situatie voordat de bouw van het project was gestart.

6.2.4 Monitoring voorafgaand aan en tijdens de bouw

Zoals blijkt uit het voorgaande, worden de grondwaterstanden beïnvloed door vele aspecten. Ook kunnen de effecten van toekomstige opstuwingsscenario's van grote invloed zijn op bestaande funderingen en kelders. Voor een goede raming voorafgaand aan de aanbesteding is grond- en oppervlaktewater dus een cruciale factor. Bij dit project is er derhalve voor gekozen om de bandbreedte van de prijsbepaling voor dit aspect zo beperkt mogelijk te houden door zorg te dragen voor voldoende gegevens vooraf. Om die reden heeft de opdrachtgever ervoor gekozen voorafgaand aan de aanbesteding en bouw van de A2-tunnel de grondwaterstanden zeer uitgebreid te monitoren.

Afgezien van het A2-project draagt WML in verband met de grondwaterwinning al zorg voor een uitgebreide grondwatermonitoring rondom Maastricht. Vanaf 2008 heeft de WML ook de grondwatermonitoring voor het Projectbureau A2 (opdrachtgever) verricht. Een belangrijk voordeel van de vroegtijdige grondwatermonitoring is dat de aannemer enig statistisch inzicht heeft in de grondwaterstanden, naast de gemeten piekgrondwaterstanden ten tijde van de Maashoogwaters 1993 en 1995 door Rijkswaterstaat.

Separaat heeft Avenue2 (de aannemer) zelfstandig een meetnet van peilbuizen opgezet met het doel aanvullende informatie beschikbaar te hebben tijdens de bouwperiode. Alle meetgegevens zijn gedurende de uitvoering van het project online beschikbaar geweest voor zowel opdrachtgever als opdrachtnemer.

6.3 Observational method

6.3.1 Aanleiding

Nadat het definitief ontwerp voor het grondonderzoek was uitgevoerd, bleek er onzekerheid te zijn in de grondeigenschappen over een deel van het totale tracé. Het ging hierbij om twee zaken, namelijk de waterdoorlatendheid en de sterkte van de kalksteen.

Sterkte kalksteen (UCS-waarde)

De onzekerheid hierin werd veroorzaakt door elkaar tegensprekende grondonderzoeksresultaten. Er was door twee afzonderlijke partijen grondonderzoek uitgevoerd, bestaande uit boringen en UCS-testen, beide met verschillende wijze van monsterneming en tevens een verschillend resultaat. De eindconclusies hebben geleid tot aanbevelingen over monstername, zie elders in dit document.

Er is gepoogd de onzekerheid over de proefresultaten weg te nemen door het doen van aanvullend in-situ onderzoek in de vorm van sonderingen. De vertaling van conusweerstand naar sterkte van de kalksteen (UCS-waarde) heeft echter als moeilijkheid dat eventueel dilettant gedrag kan leiden tot erg hoge gemeten conusweerstanden. Bovendien bleek uit aanvullend geraadpleegde literatuur dat de mate waarin deze soort kalksteen gevoelig is voor dilatatie sterk kan variëren op korte afstand, waarmee de invloed hiervan niet als constant mocht worden opgevat.

De conclusie uit het aanvullend uitgevoerde sondeeronderzoek was daardoor dat:

- er aanwijzingen waren dat in dit geval de monstername had geleid tot de ongunstige UCS-resultaten en dat de gunstigere resultaten representatief waren;
- maar dat niet kon worden uitgesloten dat de sterkte lokaal toch zou kunnen tegenvallen.

Waterdoorlatendheid

Op basis van een beperkte pompproef en tracertest, is geconstateerd dat sprake was van een verhouding tussen horizontale en verticale doorlatendheid van de kalksteen van vijf. Uitgaande van een bemalingssysteem van diepwellen (*deepwells*)[1] binnen de bouwput, levert dat een gunstig (vrijwel hydrostatisch) waterspanningsverloop in de passieve zone op. Als de genoemde verhouding van doorlatendheid echter lager zou zijn, zou dit leiden tot een ongunstig verhoogde waterspanning in de passieve zone. Het doen van aanvullende pompproeven om dat aspect beter inzichtelijk te maken, was in de voorbereidingsfase vanwege milieuoverwegingen niet toegestaan.

Uit berekeningen van de kerende wand bleek dat als beide aspecten (waterdoorlatendheid en sterkte kalksteen) gelijktijdig ongunstig zouden uitpakken, dit het ontwerp en daarmee de realisatiekosten zeer negatief zou beïnvloeden. Omdat beide aspecten te maken hebben met de afzettingsgeschiedenis van de kalksteen in dit gebied, is sprake van een gecorreleerd risico. Als de sterkte tegenvalt, dan is de kans relatief groot dat ook de doorlatendheidsverhouding tegenvalt.

Deze overwegingen hebben ertoe geleid dat de aannemer ervoor heeft gekozen om voor het deel van het tracé waar discussie bestond over UCS-waarden van de kalksteen, de observational method toe te passen.

1 Diepwellen, *deepwells*: putten tot een relatief grote diepte, waarbinnen een pomp is aangebracht.

6.3.2 Opzet

De observational method is een werkwijze waarbij intensief wordt gemonitord gedurende de uitvoering en waarbij zo nodig, gedurende de uitvoering, kan worden overgeschakeld op alternatieve uitvoeringsscenario's.

In een vooraf opgesteld werkplan waren vastgelegd:
- De grenswaarden voor de meetwaarden waarbij zou worden overgeschakeld naar een ander uitvoeringsscenario.
- De inhoud van de alternatieve uitvoeringsscenario's.
- De tijdstippen waarop de beslissing zou worden genomen.
- De beslissingsstructuur met verantwoordelijkheden per persoon.

De in het werkplan opgenomen alternatieve scenario's waren:
- Meer water onttrekken met behulp van de bestaande deepwells.
- Bijplaatsen van deepwells.
- Toepassen strooksgewijze ontgraving in het diepste deel, waarbij de overige delen pas worden ontgraven na het storten van de vloer (gebruikmakend van het 3D-effect).
- Inzet van een lokaal mobiel extra stempelraam onder het diepste stempel.

De grenswaarden zijn waarden die bij overschrijding zouden leiden tot het overschakelen op een alternatief uitvoeringsscenario. Deze zijn dusdanig gekozen dat op het moment waarop volgens deze waarden zou moeten worden besloten tot het overschakelen op een ander scenario, de constructie nog juist zou voldoen aan het vereiste veiligheidsniveau.

6.3.3 Monitoringsprogramma en ontgravingswijze

Bij A2 Maastricht was sprake van een bouwput die geleidelijk werd ontgraven met beperkte zekerheid over de passieve weerstand van de kalksteen. Vooraf stond vast dat tijdens het ontgravingsproces de situatie telkens kritischer zou worden, en dat de meest kritische situatie zou worden bereikt als de put op de maximale diepte, over de gehele breedte, zou zijn ontgraven.

Vooraf moest vaststaan dat de metingen tijdig voldoende inzicht boden in de werkelijke situatie om met zekerheid te kunnen voorspellen dat tijdens het verdere verloop, dus bij het bereiken van de maximale ontgraving, het vereiste veiligheidsniveau nog steeds werd gehaald. Om die reden was bij A2 Maastricht ook de ontgravingsvolgorde vooraf vastgelegd. De diepste ontgravingsslag vond plaats vanuit het midden van de bouwput en eindigde tegen de kerende wand. Vervolgens werd voor de te meten parameters als functie van de ontgravingsafstand vanuit het midden een nog juist acceptabele waarde vastgesteld. Deze nog juist acceptabele waarden zijn op basis van ontwerpberekeningen dusdanig bepaald dat bij het bereiken van de volledige ontgraving de benodigde veiligheid nog gewaarborgd is.

Uiteraard moesten ook de gemeten grootheden een goede graadmeter zijn voor de resterende sterkte van de passieve zone.

In deze case zijn de volgende zaken gemonitord:
- Waterspanningen in de passieve zone. Deze worden beïnvloed door zowel de verhouding tussen verticale en horizontale doorlatendheid, als de effectiviteit van de bemaling.
- Deformatiegedrag van de wand, met behulp van in de wand opgenomen helling-meetbuizen.
- Kracht in het onderste stempel. Deze wordt direct beïnvloed door de weerstand van de passieve grondwig achter de wand.

De meting van de waterspanningen is een rechtstreekse meting: toename van de waterspanning betekent een directe afname van verticale korrelspanning en dus ook passieve weerstand. De gemeten kracht in het onderste stempel is vooral afhankelijk van de stijfheidsverhoudingen tussen damwand, passieve grondwig en stempel.

Omdat de stijfheid en de sterkte van de kalksteen gecorreleerd zijn, is de deformatiemeting bruikbaar als graadmeter voor de passieve weerstand. Daar komt nog bij dat voor de situatie waarin de volledige passieve weerstand vrijwel is bereikt, de stijfheid van de kalksteen ook nog eens versneld afneemt.

De krachtswerking in de stempel hangt ook sterk af van de deformaties, waarbij de kracht die niet wordt opgenomen in de passieve grondwig direct terechtkomt in het onderste stempel.

Om zekerheid te hebben dat een eventueel bezwijkmechanisme niet plotseling zou optreden (brosse breuk), maar de deformaties vooraf voldoende waarschuwden voor een aankomend bezwijken, zijn vooraf tevens triaxiaalproeven op de kalksteen uitgevoerd. Hieruit bleek dat er wel degelijk sprake was van een aanzienlijke reststerkte nadat de piekwaarde van de sterkte was overschreden.

Geofysisch onderzoek
Reflectieseismiek, waarbij vanaf maaiveld met een groot aantal geofoons de vanaf maaiveld opgewekte trillingen worden gemeten, geeft in principe een vlakdekkend beeld over het project. Indien er met deze techniek minstens drie profielen zijn getrokken, kan er een 3D-model worden gemaakt in combinatie met de gegevens uit boringen. Boringen zijn altijd vereist om het seismisch model te ijken. De gegevens van de gebruikte geofoons kunnen ook benut worden voor zogeheten refractietomografie, dit geeft een beeld van de elasticiteitsmodulus en daarmee ook van de sterkte van de grondlagen. Bezwaar is dat de nauwkeurigheid van deze methodiek voor de relatief hoog gelegen lagen waarin de tunnel is gebouwd zeer beperkt is, waardoor de bruikbaarheid van de gegevens beperkt was.

Crosshole-seismiek is in principe beter bruikbaar; hiermee kan de laagopbouw tussen relatief dicht bijeen gelegen boorgaten (orde van 10 meter) worden verkend. Ondanks dat deze methode op een testlocatie bij een breuk prima bleek te werken, is deze niet algemeen toegepast, omdat er in dat geval erg veel boorgaten hadden moeten worden aangebracht.

Boormonsters en eisen in laboratorium
Ook in het lab dienen de boormonsters voorzichtig behandeld te worden en mogen ze absoluut niet bevriezen. Het risico bestaat dat kalksteen met een relatief lage sterkte al zou breken vóór het is beschreven en er proeven op zijn gedaan. Ook met vuursteenlagen moet voorzichtig worden omgesprongen, omdat vuursteen zich gedraagt als een bros materiaal.

Tijdens het verwijderen van de plastic casing van een boormonster wordt meteen duidelijk waar vuursteenlagen zitten; doorgaans drukken die delen tegen de liner aan. Aan de hand van een simpele pocketpenetrometertest kan meteen de variatie in sterkte in kaart worden gebracht.

Een leerpunt is dat het ten behoeve van UCS-testen tot kleinere afmetingen trimmen van een boormonster van zwakkere kalksteen (UCS-waarde kleiner dan 1 megapascal) aanleiding kan geven tot het ontstaan van microscheuren, waardoor de sterkte tijdens UCS-proeven wordt onderschat.

Indien goed uitgevoerd, kunnen monsters van boringen in de kalksteen het volgende opleveren:
- Nauwkeurig beeld van de geologie op een boorlocatie op basis van de fossielen en horizonten in de boorkernen.
- Algemene classificatietesten zoals volumegewichten en pocketpenetrometer op verkregen monsters.
- In-situ sterkte van kalksteen aan de hand van UCS-testen op verkregen monsters.
- Een vuistregel is: indien een vingernagel een monster kan indrukken, dan is de sterkte van dat deel kleiner dan 100 kilopascal.

Sonderingen en SPT's in Maastricht
Over het algemeen bepaalde de geologie in Maastricht hoe de bemonstering en geotechnische metingen dienden plaats te vinden.

Het grindpakket, zoals aanwezig in het Maasdal tussen Eijsden-Borgharen, is door middel van sonderingen (CPT's) in het algemeen niet te penetreren. Om die reden zijn in dit gebied slagsonderingen (SPT's) populair. In de onderliggende kalksteen kan wel weer worden gesondeerd, mits het bovenliggende grindpakket door middel van bijvoorbeeld een avegaar doorboord wordt, en er geen zogeheten hardgrounds, zoals vuursteenbanken, in de kalksteen aanwezig zijn. In de volgende kalksteenlagen ontbreken deze vuursteenbanken:
- Geulhem (HoGe), formatie van Houthem.
- Meerssen, formatie van Maastricht.
- Het bovenste deel van Nekum, formatie van Maastricht.

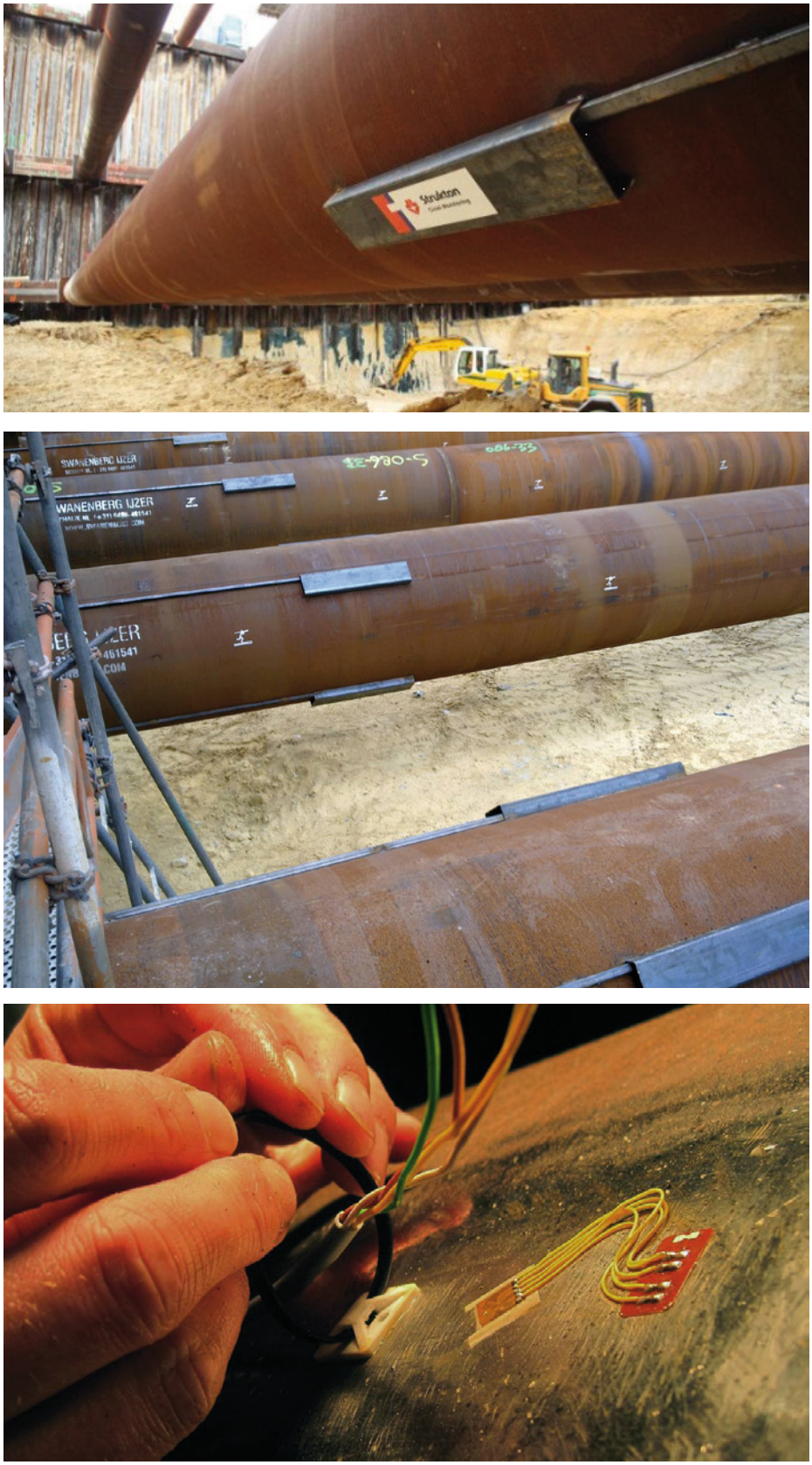
Vanwege het grote risico om een sondeerconus door breuk te verliezen, werden sonderingen met duurdere elektrische conussen in dit gebied doorgaans vermeden en werd er mechanisch gesondeerd.

De kalksteen kan ook worden onderzocht met SPT's, maar die leveren een veel beperkter inzicht op. In de kalksteen aanwezige hardgrounds zijn hiermee echter wel goed op te sporen, evenals karstzones.

6.3.4 Monitoringstechnieken

Bij de uitvoering van de monitoring voor de observational method is ervaring opgedaan met het meten van waterspanningen, doorbuiging van de wand en stempelkrachten met rekstrookjes.

Meting stempelkrachten
Er zijn diverse technieken voorhanden om stempelkrachten te meten. Grofweg zijn deze te verdelen in twee categorieën, namelijk opgenomen in of op de stempel, of op de overgang van stempel en gording. Bij de eerste categorie moet worden gedacht aan bijvoorbeeld rekstroken of optische vezels, bij de tweede categorie aan de toepassing van drukdozen of hydraulische vijzels. Het laatste – stempelkrachten meten door met hydraulische vijzels de stempel op vooraf bepaalde meettijdstippen tijdelijk los te drukken van de gording – is eerder met succes toegepast bij de parkeergarage Museumpark in Rotterdam. Voordeel van die methode is de te bereiken hoge nauwkeurigheid; nadelen zijn onder meer het feit dat er geen continue meting in de tijd beschikbaar is en dat elke meting nogal arbeidsintensief is. In het genoemde geval in Rotterdam is er sprake geweest van zes hydraulische cilinders per stempel, die voorafgaand aan elke meting zijn aangebracht op daarvoor voorbereide posities tussen stempel en gording. Vervolgens kan door verhogen van de in alle cilinders gelijk te houden druk, visueel worden geconstateerd bij welke druk de gording losraakt van de stempel. Deze druk is vervolgens een maat voor de stempelkracht.



Figuur 6.2 / Het meten van stempelkrachten.

Bij de A2-tunnel is gekozen voor vooraf aangebrachte rekstroken die achteraf, dus na plaatsing van de stempels in de bouwput, werden bekabeld. Dit had de voorkeur vanuit kostenoverwegingen en omdat de installatie daarmee minder afhankelijk werd van de bouwlogistiek. Bovendien waren geen aanpassingen nodig in de detaillering van de aansluiting van stempels en gordingen.

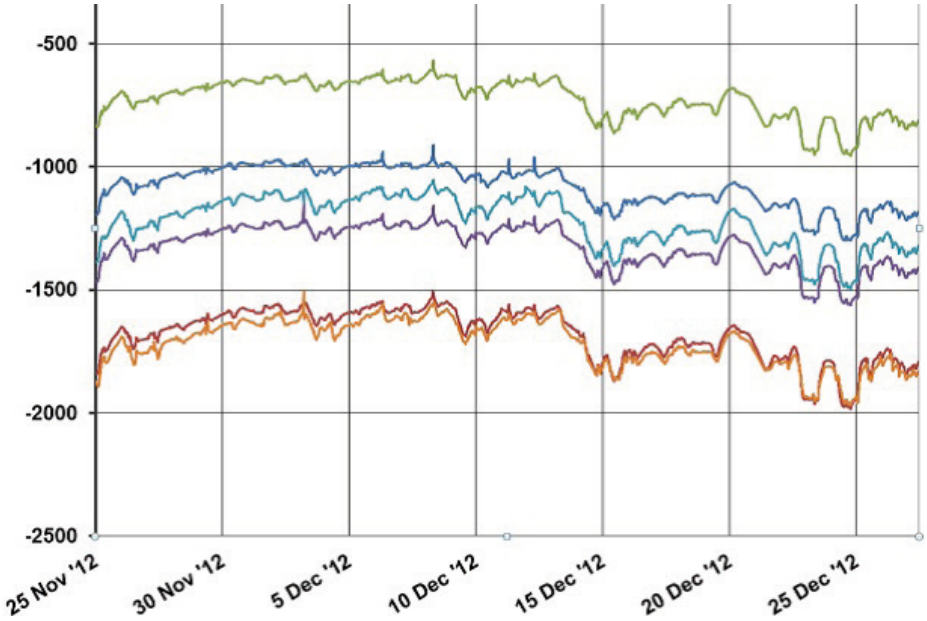
Per stempel is één doorsnede voorzien van vier rekstroken. Theoretisch is toepassing van twee rekstroken per doorsnede (boven- en onderzijde) voldoende om te kunnen corrigeren voor het buigingseffect als gevolg van de zwaartekracht. Door toepassing van drie rekstroken kunnen asymmetrie-effecten in beide richtingen (bijvoorbeeld door temperatuureffecten) worden geëlimineerd, onder de aanname van Bernouilli dat vlakke doorsneden vlak blijven. Er is voor vier rekstroken gekozen omwille van redundantie en om eventuele effecten van belastingintroductie in de stempel te kunnen uitsluiten.

De toegepaste rekstroken zijn van het type 'volle brug', gevoed door een gestabiliseerde voeding. De rekstroken zijn op nul gesteld na plaatsing van de stempels, voor het aanbrengen van de belasting door ontgraven.

Testen vooraf en aantallen geïnstrumenteerde stempels

Om vooraf inzicht te krijgen in uitvoerbaarheid en betrouwbaarheid van het meetsysteem, is een test uitgevoerd aan de hand van een teststempel die was voorzien van vier hydraulische vijzels met gekalibreerde druksensoren. In een deel van de bouwput waar geen sprake was van toepassing van de observational method, en waar de achterliggende kalksteen een dusdanige sterkte had dat de stempelkracht sterk kon worden gevarieerd zonder gevolgen voor het functioneren van de bouwput, is voor een voldoende brede range van stempelkrachten een vergelijking gemaakt tussen rekstrookmetingen en de door middel van de vijzels opgelegde stempelkracht.

Alleen het diepste stempelniveau in de bouwput is geïnstrumenteerd. Op dit niveau zijn in totaal 170 stempels toegepast, waarbij er telkens 6 per gordinglengte waren. Om vast te stellen of het noodzakelijk was om alle stempels te instrumenteren, is de variatie in stempelkracht per gording aan de hand van een meetproef vastgesteld. Hiertoe zijn in de eerste gordinglengte alle stempels geïnstrumenteerd. De gemeten stempelkrachten zijn weergegeven in FIGUUR 6.3



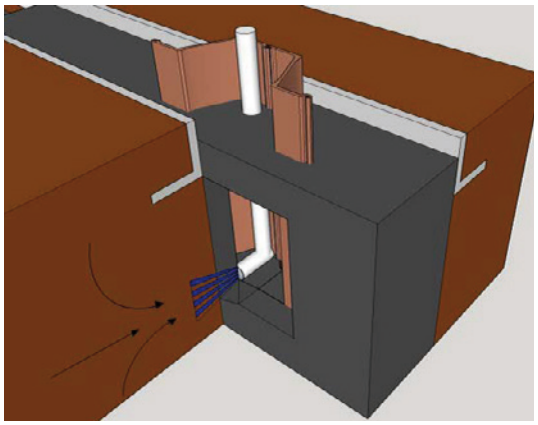
Figuur 6.3 / Registratie stempelkrachten sectie 86 na ontgraving in kN.

Uit de figuur blijkt een spreiding in resultaten. Uit analyse is gebleken dat de verschillen samenhangen met de uitvoeringswijze. Na het aanbrengen van de stempels werden namelijk allereerst vulplaten toegepast tussen gording en stempels, waarna de resterende ruimte werd opgevuld door het met grout opblazen van een groutzak. Het blijkt dat naarmate er meer vulplaten zijn, de totale ruimte minder effectief wordt gevuld door het opblazen van de groutzak. Dit betekent dat stempels met meer vulplaten slapper reageren, en dus minder stempelkracht naar zich toe trekken. Door het nauwkeuriger op de benodigde lengte assembleren van de stempels, is het mogelijk gebleken om het aantal benodigde vulplaten tot een minimum te beperken, waarmee de verschillen sterk zijn afgenomen. Omdat er geen verdere afhankelijkheden bleken te zijn, is uiteindelijk geconcludeerd dat het acceptabel is te volstaan met twee geïnstrumenteerde stempels per gordinglengte. In totaal zijn 52 stempels op deze wijze geïnstrumenteerd.

6.3.5 Waterdrukken

Bij A2 Maastricht was het de bedoeling om in de passieve zone langs de wand het verloop van de waterdruk als functie van de diepte vast te stellen. Traditioneel worden waterdrukken veelal vastgesteld aan de hand van peilbuizen. Peilbuizen binnen een bouwput zijn echter erg kwetsbaar voor schade tijdens het ontgravingsproces, terwijl uitval in dit geval niet acceptabel was. Daarnaast wordt met peilbuizen in principe de gemiddelde waterdruk over de totale hoogte van de filterlengte gemeten, terwijl er in dit geval behoefte was aan metingen over een beperkte hoogte, zonder lokale beïnvloeding van de verticale doorlatendheid van de kalksteen.

Deze redenen hebben ertoe geleid dat er voor de A2-tunnel periscopen zijn ingezet. Deze periscopen bestaan uit een stalen buis, die is gelast aan de in de cement-bentonietsleuf afgehangen damwand. Op het niveau waarop de waterspanning moet worden gemeten, is de buis omgezet in de richting van de bouwput. Dit omgezette uiteinde van de buis is tijdens de aanbrengfase waterdicht afgesloten om te voorkomen dat cement-bentoniet uit de sleuf in de buis zou dringen. Na het aanbrengen van de wand en uitharden van het cement-bentoniet, is een verbinding gemaakt met de achterliggende kalksteen door de afdichting met hoge waterdruk door te spuiten. Per meetdoorsnede zijn telkens twee periscopen over de hoogte van de passieve zone ingezet.



Figuur 6.4 / Periscopen langs de damwanden.

De goede werking is gecontroleerd aan de hand van naast de periscoop geplaatste traditionele peilbuizen. De periscopen zijn betrouwbaar gebleken. Uiteindelijk zijn van de tachtig toegepaste periscopen er twee onbruikbaar geraakt, doordat de bovenafdichting was losgeraakt en de buizen waren gevuld met grind. Meerdere periscopen bleken uiteindelijk toch vervuild met ingedrongen cement-bentoniet, maar dat was in alle gevallen

door losspuiten met hoge druk verwijderbaar. Vooraf werd tevens het risico onderkend dat de kleine periscoopopening verstopt zou kunnen raken door kalksteendeeltjes. Dit zou zich manifesteren door onrealistische waterstanden, die niet of erg traag reageren op de bemaling. Desondanks was er geen aanleiding dat dit bij de meeste periscopen zou optreden. Weliswaar zijn in sommige gevallen hogere stijghoogtes gemeten dan voorspeld, doch uit overige data valt op te maken dat deze wel realistisch waren. Geconcludeerd is dat het meetsysteem goed heeft gefunctioneerd.

Hellingmetingen
De uitbuiging van de wanden is vastgesteld door de helling als functie van de diepte te meten langs de wanden. De bepaling van de horizontale verplaatsing uit een hellingmeting, betekent wiskundige integratie van de gemeten helling naar de diepte, waarbij er een vast punt nodig is om deze aan te relateren. Normaliter wordt een hellingmeter tot een dusdanige diepte aangebracht dat vaststaat dat de onderkant zich in een laag bevindt die niet horizontaal verplaatst, zodat de onderkant als referentie kan worden aangehouden. In dit geval kon dat niet, omdat er uit praktische overwegingen voor is gekozen de hellingbuis (evenals de periscopen) vooraf aan de wand te bevestigen, zodat de buis niet langer is dan de wand. Omdat de meting samenhangt met de door de grond te leveren passieve weerstand van de wand, kan er horizontale verplaatsing van de voet van de wand worden verwacht. Sterker nog, de meting is er juist op gericht deze verplaatsing zo nauwkeurig mogelijk vast te stellen.

Overwogen is de bovenzijde van de buis als referentie te gebruiken, door de positie hiervan in elke meetronde in te meten. De bovenzijde van deze buis is echter kwetsbaar, waardoor het risico bestaat dat er meetfouten ontstaan. Bovendien is de afstand van dit referentiepunt ten opzichte van de onderzijde van de buis het grootst in het gebied waar de metingen het nauwkeurigst moeten zijn, en neemt de nauwkeurigheid af met de verticale afstand tot het referentiepunt. Om die reden is ervoor gekozen de stempelniveaus als vast punt te hanteren, waarbij in de laatste ontgravingsslag gebruik is gemaakt van de onderste stempel, rekening houdend met de elastische verkorting van de stempels die volgt uit de eveneens gemeten stempelkracht. Eventueel asymmetrisch gedrag van de bouwput – een verschil in verplaatsing aan weerszijden van de wand – kan worden vastgesteld uit vergelijking van de aan weerszijden van de bouwput geplaatste hellingmeetbuizen.

Het grote aantal benodigde hellingmeetbuizen, de lange tijdspanne waarover metingen moesten worden verzameld (vanaf start ontgraving tot en met de diepste ontgraving) en de lage benodigde meetfrequentie hebben doen besluiten geen automatische hellingmeters in te zetten, maar de metingen handmatig te verrichten.

6.4 Praktijkervaring

Tijdens de uitvoering zijn een aantal lessen geleerd. Onderstaand hiervan een overzicht.

Lastigste vuursteenlaag voor veel projecten
In de kalksteen van Valkenburg zit een zone gelegen tussen de 150 tot 400 meter ten zuiden van de grensbreuk (Faille Bordiere) die niet alleen hard is, maar ook zeer sterk en lastig te doorklieven is. De diepwandknijpers en graafmachines hebben grote moeite gehad om deze laag te slechten. Vanuit boringen en de graafervaringen is bekend dat de dikte van deze granietachtige laag circa 30 tot 50 centimeter bedraagt. Ten oosten van Bemelen loopt de dikte van deze vuursteenbank op tot ruim 1,5 meter en is daarmee de dikst bekende vuursteenbank ter wereld. Voor Maastricht is een digitaal 3D-ondergrondbestand gemaakt waarop ook deze laag gemarkeerd is. Overigens zijn de vuursteenvoorkomens rondom de horizon van Romontbosch een lastig te nemen hindernis in combinatie met de daaronder gelegen hardere kalksteen van Schiepersberg.

Zuidelijker in Maastricht, grofweg ten zuiden van Europaplein tot in Wallonië, is de bovenzijde van de formatie van Gulpen zeer rijk aan vuursteenbanken. De vuursteenrijke zones in de formatie van Gulpen zitten vooral bovenin, namelijk de leden van Lanaye en Lixhe I, II, III.

Intrillen van damwanden
Gebleken is dat het intrillen van damwanden in de kalksteen tot op zekere hoogte mogelijk is. Voorbeelden van direct ingetrilde damwanden tot in de kalksteen zijn knooppunten Europaplein en Geusselt en voor sluis Limmel. Bij Europaplein koste het veel moeite om 15 tot 17 meter te behalen, vanwege de daar aanwezige relatief harde soorten kalksteen (Valkenburg en Lanaye). Overigens is bij sluis Limmel de voortgang van de damwanden ook optisch gelogd. Dit leverde veel extra informatie over de bodemsamenstelling in en om de kuip.

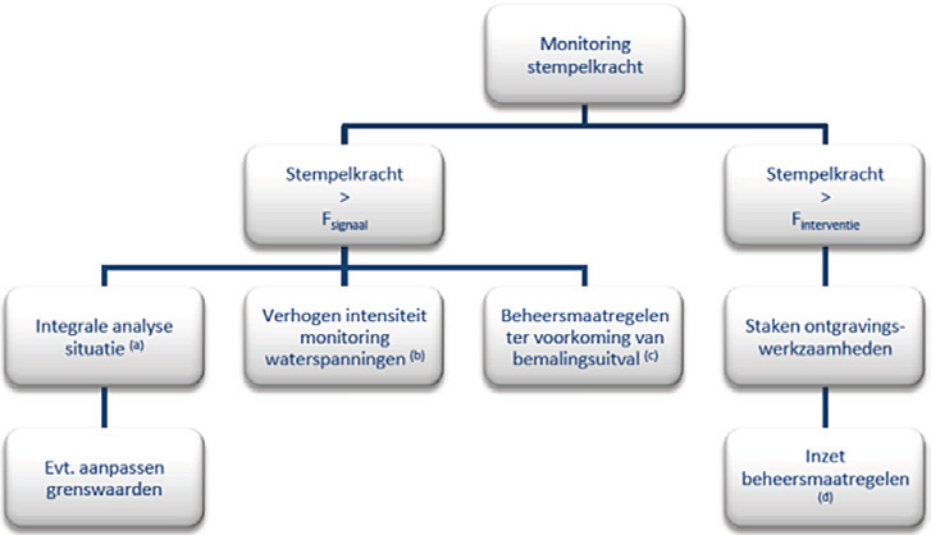
Observational method: betrokkenheid uitvoering
Rationeel bezien leidt uitvoering volgens de observational method tot een situatie waarbij men niet bij voorbaat te veel geld steekt in het versterken van de constructie waar dat niet nodig is, terwijl het risicoprofiel gunstig is omdat tijdig wordt geconstateerd of er aanvullende maatregelen nodig zijn en deze maatregelen ook in uitgewerkte vorm klaarliggen en zullen worden genomen.

Echter, het monitoren en op gezette tijden moeten beslissen over mogelijk bijsturen, kan bij bepaalde betrokkenen ook leiden tot gevoelens van onzekerheid. In dit project heeft het ertoe geleid dat de groep mensen die verantwoordelijk is voor de werkzaamheden op de bouwplaats (uitvoerders) bij voorbaat niet erg gelukkig was met deze uitvoeringsmethode en vanwege onderbuikgevoelens geneigd was tijdens het proces de controle door adviseurs verder te willen opvoeren.

Ook moet worden bedacht dat het voor deze groep extra inspanning betekent als er moet worden ingegrepen in het werkproces als gevolg van een scenariowijziging vanwege meetresultaten; uiteindelijk moet de uitvoering dat allemaal mogelijk maken en men is gewend aan projecten waarin het uitvoeringsscenario vooraf vast staat. In dit project bleek er veel energie nodig om ook bij deze groep voldoende commitment te krijgen voor de werkwijze. Het is dus ook van belang deze groep al in de ontwerpfase, als de uitvoeringsscenario's worden bedacht, voldoende te betrekken.

Observational method: beoordeling metingen
Bij de monitoring van bouwprojecten is het gebruikelijke praktijk om te werken met signaal- en interventiewaarden. Overschrijding van deze waarden leidt tot het afgaan van een automatisch alarm, dat betrokkenen waarschuwt om, na controle op juistheid van het meetresultaat, direct maatregelen te nemen, zoals het stilleggen van de uitvoering. Zonder alarm gaat de uitvoering volgens plan onverstoord verder. In het geval van de observational method ligt dit complexer, omdat op basis van meetresultaten volgens een vooraf afgesproken tijdsschema periodiek moet worden besloten met welk uitvoeringsscenario het werk zal worden voortgezet. Het gaat daarbij dus minder om de overschrijding van harde waarden, maar veel meer over de interpretatie van meestal meerdere soorten meetresultaten die in samenhang leiden tot beslissingen.

Om dit proces efficiënt te kunnen laten verlopen, is in het geval van de A2-tunnel vooraf een beslissingsschema gemaakt, waarbij ernaar is gestreefd voor elke mogelijke combinatie van meetresultaten een vooraf gedefinieerde beslissing klaar te hebben liggen, zie FIGUUR 6.5. Gedurende de lopende uitvoering van een project is er immers weinig tijd om alsnog analyses te maken.



Figuur 6.5 / Voorbeeld van een deel van het beslissingsschema.

Dit heeft goed gewerkt en heeft zeker sterk geholpen bij het nemen van beslissingen, maar desalniettemin zijn er toch gedurende de uitvoering situaties voorgekomen die niet voorzien waren en die alsnog het doen van aanvullende analyses ter plaatse noodzakelijk maakten. Vooraf was ervoor gekozen om continu een geotechnisch ingenieur op de bouwplaats beschikbaar te hebben om eventuele analyses te kunnen uitvoeren, en dat is een goede keus gebleken.

Observational method: beschikbaarheid metingen
De observational method staat of valt met de beschikbaarheid van bruikbare en betrouwbare meetgegevens. Daarom is het van het grootste belang om vooraf goede afspraken te maken over de snelheid waarmee meetresultaten beschikbaar komen en over de vorm ervan. Diverse meetresultaten zijn pas bruikbaar nadat deze zijn uitgewerkt in een bepaalde vorm: rekstrookmetingen vertaald naar een stempelkracht en hellingmeetresultaten in de vorm van een doorbuigingslijn, gerefereerd aan een bruikbaar nulpunt. Meestal is het noodzakelijk dat het tijdsbestek tussen het moment waarop de meting wordt verricht en het moment waarop het resultaat beschikbaar is, erg kort is. Bij de A2-tunnel heeft het feit dat de bouwende partij tevens de metingen verrichtte, sterk bijgedragen aan deze snelheid.

Observational method: bemalingsperikelen
Een voldoende efficiënte bemaling was in dit geval een essentieel onderdeel van het functioneren van de bouwput. De bemaling bestond uit binnen de wanden geplaatste deepwells. Daarnaast was er binnen de bouwput een oppervlaktebemaling aangebracht.

Doordat sprake was van een bouwtrein in lengterichting van de put, ontstond tijdens het proces een talud binnen de bouwput. Doordat de waterdoorlatendheid van de kalksteen in horizontale richting aanmerkelijk hoger is dan in verticale richting, en doordat de bemaling in nog niet ontgraven delen vooraf nog niet was aangezet, leidde dit talud tot een waterstroming vanuit de kalksteen naar het dieper gelegen maaiveld van het reeds volledig ontgraven deel. De grote hoeveelheid oppervlaktewater die over het maaiveld in het ontgraven deel stroomde, kon niet door de ingezette oppervlaktebemaling worden afgevoerd, wat ertoe leidde dat dit water van bovenaf in de deepwells stroomde. Doordat dit water vervuild was met kalksteendeeltjes, leidde dit tot verstoppingen van de pompen

in de wellen. Om deze verstoppingen te minimaliseren, is er in latere instantie voor gekozen om de bemaling vooruitlopend op de bouwtrein over een grotere afstand reeds in werking te stellen. Verder is bij de bouwputbegeleiding nauwgezet en doorlopend aandacht geschonken aan het beheer van de waterafvoer. Daarnaast is bij de diepste ontgraving van de bouwkuip vooraf, vooruitlopend op het diepste ontgravingsfront, de middenzone over een grotere afstand verwijderd, zodat daar eerder een oppervlakte-bemaling kon worden ingezet om de waterinhoud van de kalksteen direct boven het diepste ontgravingsniveau eerder te kunnen verwijderen.

Daarnaast is, ondanks back-upvoorzieningen, toch uitval van deepwells tijdens de uitvoering voorgekomen, mede doordat uitvoering moeite had om het verschil tussen het doel van deepwells en oppervlaktewaterpompen te begrijpen. Het koste veel inspanning om het personeel in de bouwput te begeleiden bij de juiste graafaanpak, omgang met deepwells en de verschillen tussen deepwells en oppervlaktewaterpompen.

Observational method: bijsturen gedurende de rit
De uitvoering van de observational method bestond in dit geval uit twee projectdelen die niet aaneengesloten werden uitgevoerd. Dit bood de kans tussentijds het verloop van het proces te evalueren, en op basis daarvan is de uitvoering ook bijgestuurd:

- Omdat de sterkte van de kalksteen relatief gunstig was gebleken, is onderzocht of doorgaan met de observational method wel nodig was. Dit bleek wel het geval; er was onvoldoende zekerheid dat de meevaller zich over het gehele gebied zou continueren. Dit is grotendeels gelegen in de aanwezigheid van geologische breuken en verkarste zones.
- Er is onderzocht of de metingen konden worden geoptimaliseerd, en dat heeft geleid tot een afname van het aantal geïnstrumenteerde stempels.
- Er is onderzocht of het ontgravingsproces kon worden geoptimaliseerd, en dat heeft geleid tot een vermindering van het aantal stappen.
- In zijn algemeenheid is gebleken dat een evaluatiemoment, indien inpasbaar, in het algemeen kan leiden tot optimalisatie.

Observational method: gemiste kansen
Achteraf is gebleken dat de sterkte van de kalksteen over de gehele lengte van het tracé dat met de observational method werd uitgevoerd, aanmerkelijk is meegevallen. Uit de evaluatie en de backanalyses van de meetresultaten blijkt tevens dat vermoedelijk de sterkteparameters van de boven de kalksteen aanwezige grindlaag ook aanmerkelijk gunstiger zijn geweest. Achteraf bezien is het jammer dat niet ook de kracht in het hoogste stempel is gemeten, want op basis van die meting had mogelijk tijdens het proces een verdere bezuiniging kunnen worden doorgevoerd. Uiteraard was in dit geval de methode ingezet naar aanleiding van een gesignaleerd probleem met de sterkte van de kalksteen, maar een betere focus op de kansen had ertoe kunnen leiden dat tegen een geringe extra meetinspanning meer had kunnen worden bezuinigd. De les is dus dat, indien toch al gekozen wordt voor een dergelijk traject met relatief veel metingen, het de moeite waard kan zijn de metingen nog iets op te voeren, zodat er meer speelruimte ontstaat tijdens de uitvoering.

Het belang van geohydrologisch onderzoek
In verschillende bouwputten krijgt de uitvoerende partij een goed beeld van de geohydrologische eigenschappen over een groter gebied. De geohydroloog kan met deze kennis het lokale en zelfs het regionale grondwatermodel verbeteren. Het vastleggen en toepassen van deze opgedane kennis is relevant voor de waterleidingmaatschappij en voor bevoegde gezagen. Verder is de praktische en theoretische kennis van het A2-project relevant gebleken voor bodemenergie-opslagsystemen.

Door vooraf goed na te denken over grondwater, is de tunnel van een effectieve maatregel voorzien die extra overlast als gevolg van opstuwing vermijdt. Tijdens de bouw is geleerd dat het passeren van de geologische breukzone door de tunnel ook zonder sifons nauwelijks tot grondwateroverlast zou hebben geleid. De kalksteen was in een omvangrijke zone midden in de tunnel aanmerkelijk doorlatender. Ook hier hadden de twee pompproeven meer inzicht kunnen verschaffen in de geohydrologische eigenschappen van de kalksteen in het midden en zuidelijke deel van de tunnel. Het niet kunnen verrichten van deze proeven vanwege het rigide beleid met betrekking tot grondwaterverontreinigingen heeft tot behoorlijke meerkosten geleid om de VOCL-vlekken goed te kunnen beheersen in de bouwkuip. Deze beheersing diende enerzijds de Arbo-technische kant. Het gevaar bestond dat de bemaling de vlek de bouwput kon binnentrekken voordat de ontgraving was opgestart. Anderzijds konden schone zones buiten de bouwput door de bemaling verontreinigd raken. Advies aan alle bevoegde gezagen is om een beperkte verspreiding van verontreinigingen voor onderzoek toe te laten, zodat grotere problemen in de uitvoering voorkomen kunnen worden.

Pompproeven

Zoals eerder vermeld, waren er vooraf drie pompproeven voorzien. Dit aantal was gebaseerd op de langs het tracé voorkomende geologisch verschillen, die een verschil in geohydrologische parameters waarschijnlijk maakten. Over deze parameters was onvoldoende informatie uit andere projecten te halen. Vanwege de aanwezigheid van VOCL-vlekken en de angst van het bevoegd gezag dat deze vlekken verspreid zouden worden door een pompproef, moesten twee van deze proeven afgeblazen worden. Dit veroorzaakte een hiaat in het preventieve maatregelenpakket, wat de volgende bezwaren opleverde:

- Er moesten meer aanvullende Arbomaatregelen getroffen worden in de bouwkuip tijdens de uitvoering.
- Er was meer monitoring gedurende de bouwfase nodig.
- Optimalisatie van de bemalings- en retourbronnen moest plaatsvinden tijdens de uitvoering.
- Het feit dat de bemaling niet vooraf kon worden geoptimaliseerd, heeft geleid tot hogere debieten en meer omgevingsinvloed.
- Mede omwille van de onzekerheid over geohydrologische parameters moest de observational method worden ingezet.
- Het sifonsysteem, ingebouwd om grondwaterstandsverschillen aan weerszijden van de tunnel te nivelleren, had waarschijnlijk volledig of grotendeels achterwege kunnen blijven indien informatie uit extra pompproeven beschikbaar was geweest.

Nog afgezien van de hogere uitvoeringskosten die het ontbreken van twee pompproeven heeft veroorzaakt, is er waarschijnlijk uiteindelijk ook meer verspreiding van verontreiniging opgetreden dan strikt noodzakelijk was. Achteraf kan geconcludeerd worden dat het niet mogen uitvoeren van deze proeven voor alle partijen nadelig is geweest.

Bijlage A Spoorzone Delft

A.1 Fasering in de settlement risk assessment

De SRA met betrekking tot de tunnel van Spoorzone Delft is ingedeeld in drie fasen. Fase 1 dient ter inschatting van de te verwachten bouwschade ten gevolge van de zettingveroorzakende bouwwerkzaamheden. De analyse is in deze fase uitgevoerd op basis van een voorlopig ontwerp en voorlopige geotechnische parameters. Omdat het in deze fase nog niet mogelijk is de huidige conditie van alle belendingen goed in te schatten, wordt verondersteld dat de representatieve gebouwconditie als goed kan worden gekenmerkt.

SRA-fase 1 omvat:
- Archiefonderzoek gebouwen.
- Berekening zettingen van de grond.
- Projectie van de bekomen zettingen op de individuele gebouwen.
- Bepalen van de karakteristieke schadeparameters (zakkingen, rotaties, relatieve rotaties, etc.).
- Opstellen/definiëren schadeclassificatiesysteem.

Met het doorlopen van bovenstaande stappen, werden alle gebouwen ingedeeld in schaderisicoklassen volgens onderstaande classificatie:
- Klasse A: Verwaarloosbare schade, scheurwijdte circa 0,1 millimeter of minder.
- Klasse B: Zeer lichte esthetische schade, scheurwijdte circa 0,1 tot 0,2 millimeter.
- Klasse C: Lichte esthetische schade, scheurwijdte circa 2 tot 5 millimeter.
- Klasse D: Onacceptabele esthetische schade, begin van functionele bouwschade, verlies van constructieve stabiliteit, scheurwijdte groter dan 5 millimeter, mitigerende maatregelen in ontwerp noodzakelijk.

De SRA-fase 2 is bedoeld om het schaderisico van de belendingen nauwkeuriger te voorspellen door tevens de huidige conditie van de belendingen in de schaderisicobeoordeling te verdisconteren.

SRA-fase 2 omvat:
- Gedetailleerd archiefonderzoek.
- Lintvoegmetingen en scheefstandsmetingen van gebouwen.
- Funderings- en casco-onderzoek van belendingen die een visuele inspectie en gedetailleerde bouwkundige opnamen omvat.
- Kwaliteitsclassificatie van de gebouwen door middel van een beproefde transparante methodiek.

In de laatste stap worden alle gebouwen ingedeeld in een kwaliteitsklasse (I tot IV), gebaseerd op gemeten scheefstanden en geconstateerd aanwezige schadebeeld (scheurvorming met grenswaarden identiek aan deze in schaderisicoclassificatie van SRA-fase 1).

Het combineren van de initiële schaderisicoklasse (SRA-fase 1) en de kwaliteitsklasse (SRA-fase 2) leidt uiteindelijk via een zogeheten combinatiematrix tot de gecombineerde schaderisicoclassificatie. Afhankelijk van de uitkomsten van de gecombineerde risicoclassificatie kunnen maatregelen nodig zijn om het risicoprofiel te verminderen; hetzij door aanpassing van het civieltechnisch ontwerp, hetzij door het herstellen van de belendingen.

Gecombineerde schaderisicoclassificatie				
schaderisico-klasse	kwaliteitsklasse			
	I	II	III	IV
A	1	2	3	4
B	2	2	3	4
C	3	3	4	4
D	4	4	4	4

Gecombineerde schaderisicoclassificatie				
schaderisico-klasse	kwaliteitsklasse ← versterking fundering/casco			
	I	II	III	IV
A (↑ zettingsreducerende maatregelen)	1	2	3	4
B	2	2	3	4
C	3	3	4	4
D	4	4	4	4

Figuur A.1 / Schaderisicoclassificaties.

In de SRA-fase 3 wordt dan het definitief ontwerp gemaakt, waarbij met eindige-elementenberekeningen de te verwachten deformaties van de belendingen zo nauwkeurig mogelijk worden bepaald en getoetst aan de vooraf bepaalde grenswaarden.

A.2 Grenswaarden en deformaties Phoenixstraat fase 1

In FIGUUR A.2 wordt een overzicht gegeven van de initieel vastgelegde grenswaarden U_x en U_y per gebouwblok in de Phoenixstraat, alsook de daadwerkelijk gemeten deformaties in de meest belangrijke uitvoeringsstappen van de eerste fase. Aangezien er meerdere prisma's per gebouw(blok) zijn aangebracht, wordt er steeds een minimum- en maximumwaarde van de meetdata gegeven. Voor de fase 5c, die het einde van de eerste fase betekent, zijn de meetwaarden die hoger zijn dan de berekende grenswaarden in die fase met een gele kleur aangeduid.

De waarden van $U_{x;ontw}$ en $U_{y;ontw}$ zijn de ontwerpwaarden volgens de theoretische ontwerpberekeningen. De waarden $U_{x;min}$/$U_{x;max}$ en $U_{y;min}$ / $U_{y;max}$ zijn de respectievelijke minimale en maximale meetwaarden voor U_x (horizontaal) en U_y (verticaal). De waarden in de tabellen zonder hoofding zijn de verhoudingen van ($U_{gementen}$/$U_{ontwerp}$).

Bij twaalf van de dertig gebouwblokken was er een overschrijding van de vooraf bepaalde grenswaarden. Toch heeft dit geen aanleiding gegeven tot een wijziging van de vooraf gekozen mitigerende maatregelen, noch heeft deze schijnbare overschrijding tot enige schade geleid. Reden is dat de grenswaarden aan de berekeningen waren gerelateerd en niet aan de restvervormingscapaciteit van de gebouwen zelf.

		K&L						ontgr diepw						ontgr ok tussenst (2c)						max ontgr oostb (3)						oostbuis gereed (5c)									
gebouw		ux;ontw	ux;min	ux;max	uy;ontw	uy;min	uy;max	ux;ontw	ux;min	ux;max	uy;ontw	uy;min	uy;max	ux;ontw	ux;min	ux;max	uy;ontw	uy;min	uy;max	ux;ontw	ux;min	ux;max	uy;ontw	uy;min	uy;max	ux;ontw	ux;min		ux;max		uy;ontw	uy;min		uy;max	
Wateringsevest 1-11	geel																																		
Wateringsevest 1-6	oranje	0	0,97	1,36	0	0,23	0,32	1,2	0,84	2,83	1,3	0,49	1,57	2,4	0,77	1,46	3	1,19	1,77	3	1,97	2,66	4,6	0,89	1,87	3,7	2,07	0,56	3,66	0,99	5,1	0,17	0,03	1,12	0,22
Dirklangendwarsstraat 44	oranje	1	0,24	1,61	1	0,01	0,83	2,5	0,22	1,81	2,7	0,14	3,51	3,7	2,32	4,61	4,4	2,81	3,61	4,3	3,64	6,21	6	2,86	4,31	5	3,67	0,73	7,51	1,50	6,5	0,26	0,04	2,01	0,31
Dirklangendwarsstraat 29	oranje	1	0,38	1,17	1	0,07	0,22	2,5	0,52	2,52	2,7	2,07	2,29	3,7	2,92	4,72	4,4	2,17	2,47	4,3	4,32	6,32	6	2,19	2,57	5	3,32	0,66	6,27	1,25	6,5	3,88	0,60	4,79	0,74
Dirklangenstraat 6	geel	2,6			2,6			3,7	0,23	0,35	4,1	0,49	0,94	9,9	2,03	2,15	10,1	2,26	3,49	10,7			15,4			12,7					16,1				
Phoenixstraat 110-108	geel	2,6			2,6			5,7	0,08	0,98	7,5	0,62	1,76	5,8	1,32	1,62	10,5	3,34	3,72	4,5	1,62	1,92	13,8	4,74	5,12	7,1	3,42	0,48	4,22	0,59	14,6	5,74	0,39	6,12	0,42
Phoenixstraat 106	geel	2,6			2,6			5,7	0,1	0,67	7,5	1,2	2,91	5,8	0,83	1,8	10,5	3,19	3,8	4,5	1,53	2,5	13,8	5,19	5,6	7,1	3,13	0,44	4,4	0,62	14,6	6,39	0,44	6,5	0,45
Phoenixstraat 104-102	geel	2,6			2,6			5,7	1,34	1,58	7,5	0,79	1,34	5,8	0,86	1,39	10,5	2,71	4,27	4,5	1,62	2,69	13,8	4,91	6,47	7,1	3,26	0,46	3,69	0,52	14,6	6,16	0,42	7,57	0,52
Phoenixstraat 100	oranje	2,6			2,6			5,7	1,45	1,62	7,5	1,28	1,65	5,8	0,45	1,58	10,5	4,25	4,72	4,5	2,68	3,15	13,8	6,55	6,92	7,1	4,08	0,57	4,25	0,60	14,6	7,65	0,52	7,72	0,53
Phoenixstraat 96	geel	2,6			2,6			5,7	0,92	2,22	7,5	0,92	1,72	5,8	2,28	4,33	10,5	4,69	6,78	4,5	0,03	6,18	13,8	4,98	8,58	7,1	4,68	0,66	6,18	0,87	14,6	7,7	0,53	9,48	0,65
Phoenixstraat 94-92	geel	2,6			2,6			5,7	1,52	1,6	7,5	0,82	1,02	5,8	4,2	5,88	10,5	4,88	6,88	4,5	6,8	8,18	13,8	6,68	8,48	7,1	6,5	0,92	7,68	1,08	14,6	7,18	0,49	9,18	0,63
Phoenixstraat 90-88	geel	2,6			2,6			5,7	1,44	2,11	7,5	0,89	5,99	5,8	3,3	4,75	10,5	6,14	9,11	4,5	0,06	6,76	13,8	6,24	9,41	7,1	4,6	0,65	6,26	0,88	14,6	7,14	0,49	9,23	0,63
Bagijnhof 2a	groen																																		
Phoenixstraat 86a	groen																																		
Phoenixstraat 68	rood	2,6			2,6			3,9	2,07	3,28	5,2	2,03	2,59	2,6	1,95	3,09	8,3	1,93	3,59	1,3	2,17	3,89	11,1	3,63	10,89	3,6	0,85	0,24	4,49	1,25	12,4	2,34	0,19	7,17	0,58
Phoenixstraat 66	geel	2,6			2,6			3,9	0,8	3,24	5,6	1,04	1,65	4,3	0,4	2,74	9,4	0,06	1,45	5,5	0,1	3,84	14,8	0,46	2,25	8,5	1,38	0,16	2,37	0,28	17,1	0,08	0,00	1,65	0,10
Phoenixstraat 64	geel	2,6			2,6			3,9	0,18	0,82	5,6	0,63	1,33	4,3	0,76	2,2	9,4	0,05	0,62	5,5	0,22	3,1	14,8	0,75	3,08	8,5	3,47	0,41	3,8	0,45	17,1	0,18	0,01	0,65	0,04
Phoenixstraat 62	groen																																		
Phoenixstraat 56	oranje	2,6			2,6			3,9	1,6	2,15	5,6	2,79	4,84	4,3	2,71	4,06	9,4	4,99	7,84	5,5	3,61	5,86	14,8	2,29	4,53	8,5	3,71	0,44	5,36	0,63	17,1	10,19	0,60	12,84	0,75
Phoenixstraat 54	oranje	2,6			2,6			3,9	2,01	4,47	5,6	2,92	4,37	4,3	4,01	4,97	9,4	5,78	6,97	5,5	4,42	6,56	14,8	2,22	6,01	8,5	4,17	0,49	5,31	0,62	17,1	11,48	0,67	13,17	0,77
Phoenixstraat 52	oranje	2,6			2,6			3,9	2,46	3,04	5,6	3,07	4,78	4,3	2,55	3,75	9,4	5,97	7,58	5,5	3,25	5,65	14,8	1,36	2,76	8,5	2,35	0,28	5,25	0,62	17,1	11,27	0,66	13,38	0,78
Phoenixstraat 50a	geel	2,6			2,6			3,9	0	1,88	5,5	0,7	1,69	0,9	0,9	4,05	9,3	0,35	11,29	-1,3	2,8	5,4	8,2	7,88	9,07	0,4	1,87	4,68	3,6	9,00	10,3	10,28	1,00	11,96	1,16
Phoenixstraat 49	groen																																		
Phoenixstraat 41-48	geel	2,6			2,6			3,9	3,83	4,3	5,5	0,89	1,06	0,9	2,93	3	9,3	1,39	1,64	-1,3	1,6	2,03	8,2	2,39	2,44	0,4	0,23	0,58	0,4	1,00	10,3	2,54	0,25	2,59	0,25
Sint Agathaplein 2-5	oranje	2,6			2,6			3,9	0,72	3,13	5,5	4,93	6,03	0,9	2,12	5,22	9,3	5,23	6,05	-1,3	2,42	5,62	8,2	6,8	7,45	0,4	3,45	8,63	7,22	18,05	10,3	7,8	0,76	9,03	0,88
Phoenixstraat 32 links	geel	2,6			2,6			3,9	0,09	1,45	5,6	0,07	1,3	4,7	0,18	1,84	8,9	0,5	1,77	5,4	0,08	2,34	10,7	1,12	2,47	6,7	0,09	0,01	2,34	0,35	13,1	1,1	0,08	2,87	0,22
Phoenixstraat 32 rechts	geel	2,6			2,6			3,9	0,04	3,35	5,6	0,1	1,95	4,7	0,65	3,59	8,9	1,09	1,93	5,4	0,95	3,99	10,7	1,39	2,65	6,7	0,75	0,11	3,45	0,51	13,1	1,69	0,13	2,85	0,22
Phoenixstraat 30 links	geel	0			0			1,3	2,49	2,57	3	0,38	3,1	-0,3	0,17	2,79	5,8	0,02	4,7	-0,4	0,83	2,99	6	3,38	7,8	1,2	2,33	1,94	4,09	3,41	8,6	7,38	0,86	10,9	1,27
Phoenixstraat 30 rechts	rood	0			0			1,3	1,01	4,44	3	1,68	7,53	-0,3	2,93	5,9	5,8	3,35	6,11	-0,4	2,43	6,84	6	5,43	8,88	1,2	3,63	3,03	8,3	6,92	8,6	7,13	0,83	11,21	1,30
Phoenixstraat 28	groen	2,6			2,6			8,4	2,42	2,42	9,3	1,8	1,8	9,5			13,6			10,2			18,1			11,2					19				
Phoenixstraat 10-22	groen	2,6			2,6			8,4	0,13	2,37	9,3	0,67	1,52	9,5	1,12	3,57	13,6	0,7	1,57	10,2	1,12	5,17	18,1	0,6	2,77	11,2	1,12	0,10	2,47	0,22	19	0,52	0,03	1,2	0,06
Phoenixstraat 8	oranje	2,6			2,6			5,6	2,48	3,76	7,3	1,4	3,17	7,6	3,64	4,86	11,1	0,3	4,37	9,8	4,08	4,9	18	1,2	5,07	11,1	6,94	0,63	8,47	0,76	18,4	7,9	0,43	11,87	0,65
Phoenixstraat 6	oranje	2,6			2,6			5,6	0,05	3,35	7,3	1,48	3,43	7,6	0,15	3,41	11,1	0,82	4,56	9,8	0,65	5,81	18	0,78	5,73	11,1	4,05	0,36	8,21	0,74	18,4	8,23	0,45	12,26	0,67
Phoenixstraat 4c	oranje	0			0			2,5	2,07	3,75	3,4	1,78	2,05	2,8	4,37	6,35	5,3	2,78	4,7	3,2	1,25	8,42	8,3	4,29	15	4,5	10,62	2,36	11,13	2,47	8,7	9,55	1,10	13,59	1,56
Phoenixstraat 4a	oranje	2,6			2,6			4,7	1,57	2,72	5,3	1,57	2,1	5,7	3,67	5,02	7,7	2,37	3,1	5,9	5,57	6,92	9,9	4,4	4,65	6,8	6,87	1,01	9,12	1,34	9,4	9,38	1,00	10,17	1,08
Phoenixstraat 2	oranje	2,6			2,6			4,7	1,81	3,12	5,3	1,11	1,75	5,7	4,21	5,12	7,7	1,49	2,45	5,9	6,01	7,72	9,9	4,21	4,62	6,8	7,41	1,09	9,42	1,39	9,4	8,71	0,93	10,09	1,07
Binnenwatersloot 8	oranje	2,6			2,6			4,7	1,57	3,46	5,3	1,18	5,02	5,7	3,78	5,75	7,7	1,58	4	5,9	5,27	7,76	9,9	2,78	8,5	6,8	9,02	1,33	9,66	1,42	9,4	8,59	0,91	10,84	1,15
Binnenwatersloot 10	oranje								0,03	2,54		1	3,18																						

Figuur A.2 / Initieel vastgelegde grenswaarden en gemeten waarden.

A.3 Overschrijdingen Westvest 5A

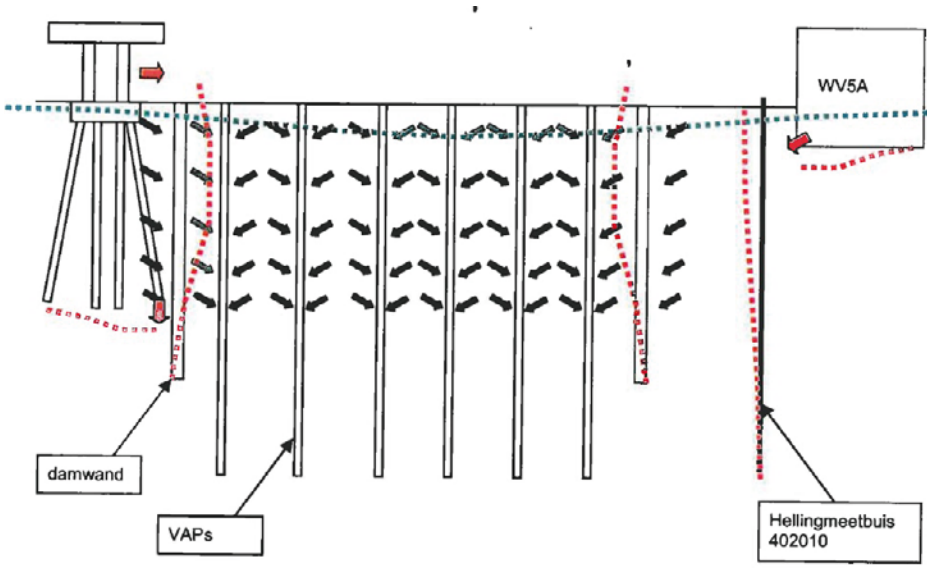
A.3.1 Oorzaak

De verplaatsingen zijn duidelijk opgetreden tijdens het inbrengen van de damwanden en de VAP's. Bij beide systemen wordt het funderingselement via trillingsenergie in de grond gebracht. Wanneer dit gebeurt in een grondslag die verdichtingsgevoelig is, zal er in de omgeving van het ingebrachte element grondvervorming kunnen optreden.

Door CCL was dit risico in het ontwerpstadium onderkend. Er zijn voor de SRA-predicties gemaakt voor het inbrengen/uittrillen van de damwandplanken. Uit de predictie werd geconcludeerd dat de invloedszone circa 14 à 15 meter zou zijn, zodat er geen gevolgen zouden zijn voor het pand. Hierbij heeft men zich gebaseerd op wetenschappelijke literatuur (Meijers, 2007). Blijkbaar heeft er zich een schaaleffect voorgedaan, waarbij de rekenregels, die in de literatuur gebaseerd waren op proeven met lichtere en kortere damplanken in een grondslag met een minder dikke verdichtingsgevoelige zandlaag, een te nauw invloedsgebied voorspelden voor de in Spoorzone Delft geldende situatie. Dat de invloed afneemt naarmate de bouwkuip verder van het gebouw is gelegen, is gemakkelijk terug te zien in de monitoringsdata.

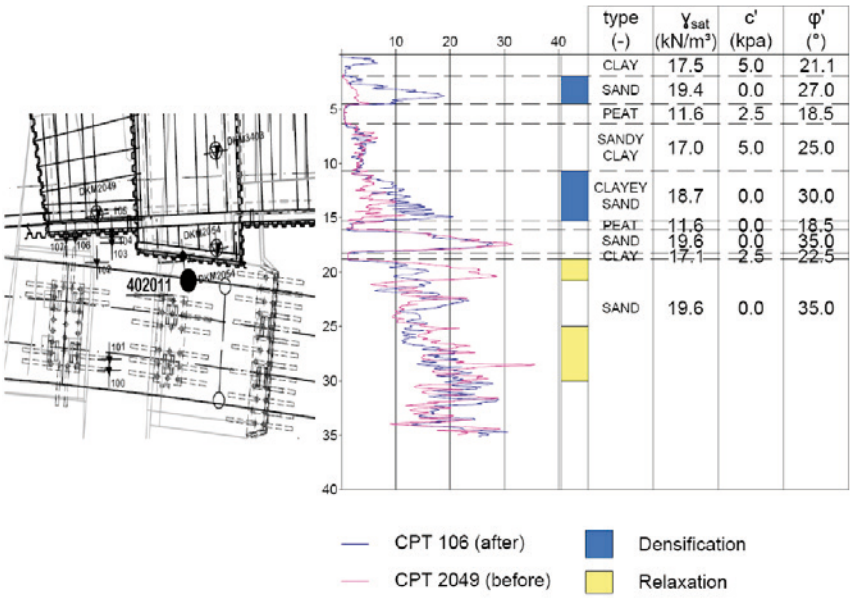
Bovenop dit scenario heeft de installatie van de VAP's ook zijn invloed gehad. Bij dit paaltype wordt een stalen buis op diepte getrild, waarna die na het plaatsen van de GEWI-wapeningsstaaf onder groutinjectie trillend wordt getrokken. Hierbij is de losgepakte zandlaag binnen de damwand tot grotere diepte verdicht, waarbij de damwanden ook naar binnen zijn verplaatst.

In FIGUUR A.3 is schematisch weergegeven hoe het installeren van damwanden en VAP's tot de deformaties heeft kunnen leiden. De zwarte pijltjes geven de richting van de grondvervorming aan. De rode pijltjes en de rode stippellijnen geven respectievelijk de richting van de deformatie van de achterliggende constructie en de vermoedelijke vervormingslijnen aan. De groene stippellijn geeft aan hoe het maaiveld vervormd kan zijn.



Figuur A.3 / Deformaties Westvest 5a.

Na het optreden van de vervormingen zijn nabij het viaduct nasonderingen tussen de VAP's in de bouwput gemaakt. In FIGUUR A.4 is te zien hoe de conusweerstand is veranderd ten opzichte van de sonderingen die origineel zijn gemaakt. De losgepakte zandlagen zijn door het intrillen van de damwanden en VAP's verdicht, terwijl de matig tot vastgepakte zandlagen juist zijn ontspannen.



Figuur A.4 / Conusweerstand volgens nasonderingen nabij het viaduct.

A.3.2 Plan van aanpak vervolgproces

Aangezien er rekentechnisch geen ruimte meer was om het gebouw nog verder te laten vervormen zonder hierbij het risico te lopen op bijkomende schade, werd besloten om een uitvoeringsmethode te kiezen die de nog te verwachten deformaties tot een minimum zou beperken, gekoppeld aan een stapsgewijze voortgang (een go/no-goproces) waarbij de monitoringsgegevens van elke stap in de uitvoering werden vergeleken met aan de prognosewaarden.

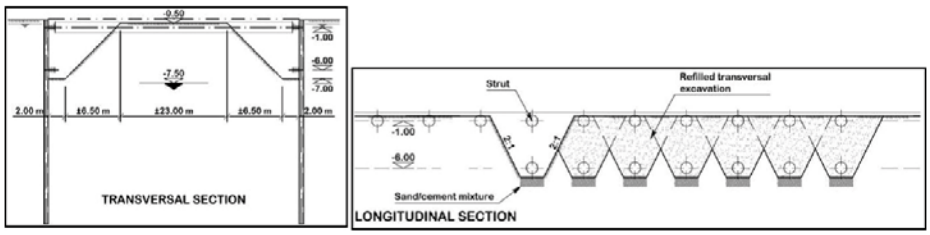
Aan de basis lag een nieuwe eindige-elementenberekening (Plaxis) van de vervolgstappen, waarbij de grondkarakteristieken werden gefit aan de gemeten deformaties in inclinometer 402010. Deze berekeningen gaven grotere deformaties van het gebouw Westvest 5a dan in realiteit gemeten. Dit werd (vermoedelijk) veroorzaakt door de stijfheid van het gebouw zelf en de grond-structuurinteractie die in de rekenmodellen conservatief is verwaarloosd. Als nieuwe grenswaarden werden de laatste meetwaarden van de prisma's verhoogd met respectievelijk 10 millimeter (horizontaal) en 9,5 millimeter (verticaal) zoals weergegeven in FIGUUR A.5.

Building :	Westvest 5A (New SRA)			
	Ground deformations		Prism 47346	
	u_x [mm]	Z [mm]	u_x [mm]	Z [mm]
Now	23.4	-23.8	15.7	-14.6
Pumping -6m NAP	27.1	-25.8	18.4	-16.6
Before place strut	28.3	-27.1	19.6	-17.9
After place strut	25.0	-26.4	16.3	-17.2
Excavation -10.3m (NAP)	29.9	-28.2	21.2	-19
Strut Removal	32.4	-31.8	23.7	-22.6
Tunnel Ready	32.4	-33.3	23.7	-24.1

Figuur A.5 / Nieuwe grenswaarden Westvest 5a.

Bijkomende mitigerende maatregelen konden ervoor zorgen dat:

- het onderste stempelraam kon worden voorgespannen voordat er een significante ontgraving binnen de bouwkuip had plaatsgevonden (dit werd gerealiseerd door een zeer gefaseerd ontgravings-/aanvullingsproces zoals weergegeven in FIGUUR A.6);



Figuur A.6 / Gefaseerd ontgravings- en aanvullingsproces.

- de hoek tussen damwand en vloerplaat zich stijf zou gedragen bij het wegnemen van het onderste stempelraam (dit werd gerealiseerd door het onderste deel van de tunnelwand tot tegen de damwand aan te storten en door beide elementen tot een ultrastijve hybride ligger om te vormen).

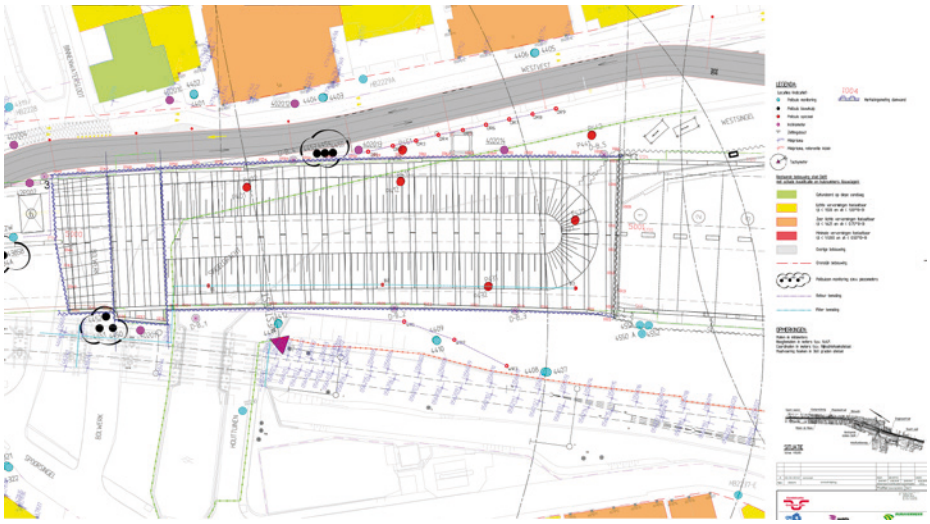
Met deze maatregelen zouden de bijkomende deformaties eerder klein blijven (orde circa 10 millimeter). Een bijkomende ankerrij had dusdanig weinig effect (reductie van maximaal 2 millimeter deformatie), alsmede een risico op zelfs grotere deformaties dan 2 millimeter tijdens het aanbrengen van de ankers zelf onder het gebouw, zodat deze optie niet werd geïmplementeerd.

A.3.3 Monitoring vervolgproces

Om alle bewegingen van het gebouw nauwkeurig te kunnen volgen, werden bijkomende meetpunten aangebracht. Deze bestonden uit:

- Een rij 'stickers' ter hoogte van de bestaande bovenste rij prisma's om beter de gemeten differentiële vervorming tussen de prisma's te kunnen begrijpen.
- Bijkomende manueel in te meten prisma's aan beide zijgevels om beter te kunnen besluiten of het gebouw eerder stijf kantelt (tilt), dan wel een hoekverdraaiing ondergaat.
- Scheurwijdtemeters bij belangrijkste bestaande scheuren op diverse locaties binnen en buiten het gebouw.

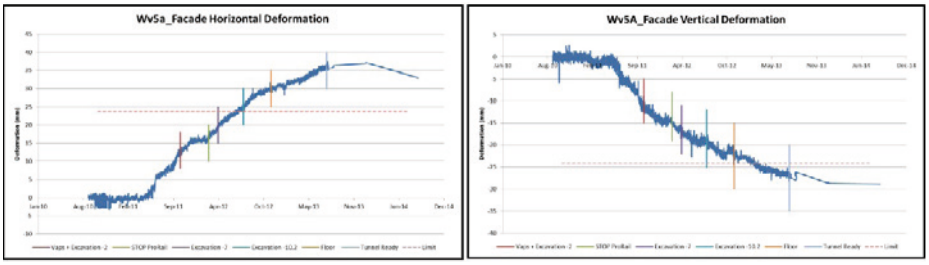
Er werden ook vier bijkomende inclinometers rondom de bouwkuip geplaatst.



Figuur A.7 / Bijkomende inclinometers rondom de bouwkuip.

Inclinometer 402011 had als doel om de gronddeformaties ter hoogte van de funderingen van het viaduct te monitoren. Inclinometer 402014 is naast het zuidelijke gedeelte van de bouwkuip geplaatst, ter hoogte van het (verderaf gelegen) gebouw Westvest 7 (wat een spiegelgebouw van Westvest 5a is). Inclinometer 402013 is naast de bouwkuip aangebracht, ter hoogte van gebouw Westvest 5a, terwijl inclinometer 402012 zich in ongeveer dezelfde dwarsdoorsnede als 402013 bevindt, maar dan net voor de gevel van gebouw Westvest 5a.

Door deze opstelling van de inclinometers kon een soort observational method (eigenlijk meer een '*best way out*'-methodiek) toegepast worden, waarbij elke uitvoeringsstap eerst in het zuidelijke bouwkuipgedeelte werd gerealiseerd en gemonitord, en vervolgens in het noordelijke deel. Meetdata in inclinometer 402014 gaven dan, op basis van ervaring, een accurate voorspelling van wat er in inclinometers 402013 en 402012 verwacht kon worden en wat de effecten op het gebouw Westvest 5a zouden zijn. FIGUUR A.8 toont de deformaties bij einde werk (bouwkuip heraangevuld en bemaling in bouwkuip stilgelegd).



Figuur A.8 / Deformaties Westvest 5a bij einde werk.

Uiteindelijk blijkt de finale horizontale deformatie toch nog groter te zijn dan de resetgrenswaarde. De deformatie die voorspeld was op basis van de fit met de inclinometer 402010 lijkt als het ware realiteit geworden. Dit is enerzijds te verklaren door de gemeten onderperformantie van het voorspannen van de stempels, en anderzijds door het vermoedelijk deels verlies van de stijfheid tussen constructie en grond bij grotere deformaties. Voor de verticale deformaties is de voorspelde grenswaarde verwaarloosbaar overschreden.

Na beëindiging van de werkzaamheden werd het gebouw gerenoveerd wat betreft de aanwezige cosmetische schade.

A.4 Overschrijdingen bestaand stationsgebouw

A.4.1 Oorzaak

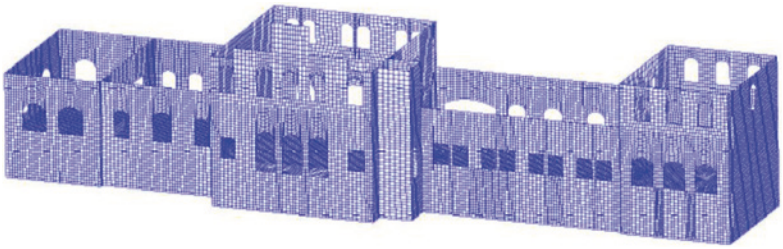
De installatie van de VAP's in het stationsgebied werd uitgevoerd voorafgaand aan de installatie van de VAP's in het Bolwerkgebied. Toen de grote deformaties in het stationsgebied werden opgetekend, was men de mening toegedaan dat dit vooral te wijten was aan het feit dat men de paalcasinggaten boven toekomstig ontgravingsniveau ongevuld had achtergelaten (geen vulling met grout), waarna de grond tijdens de volgende naburige paalinstallaties in deze gaten 'viel' en zodoende een grote graad van ontspanning onderging met grote horizontale deformaties als gevolg.

Derhalve werd besloten om de nog te realiseren palen voor het bestaande stationsgebouw met een veel trager installatieprocedé te gaan uitvoeren waarbij afpersen op overdruk over de gehele paallengte werd toegepast. De VAP-machine werd overgeplaatst naar de Bolwerkkuip, aangezien men dacht dat daar geen risico zou bestaan voor de veel verderaf gelegen belendende constructies, zeker wanneer men de paalcasinggaten zou afgrouten over de volledige hoogte. Dat dit een verkeerde veronderstelling was, is te lezen in HOOFDSTUK 5.

A.4.2 Plan van aanpak vervolgproces

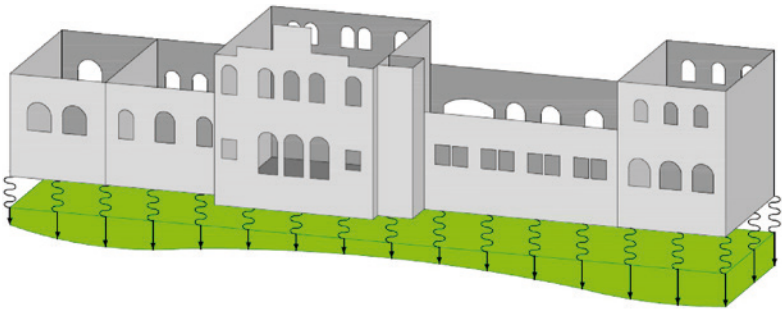
Ondanks het feit dat er nog enige reserve deformatiecapaciteit aanwezig was, werd er door opdrachtgever en vergunningverlenende instanties, samen met verzekeraars, op aangedrongen om het vervolgproces uit te voeren met een stapsgewijze voortgang (een go/no-goproces) waarbij de monitoringsgegevens van elke stap in de uitvoering werden vergeleken met de prognosewaarden.

Tevens werd geëist dat de deformatieprognoseberekeningen (Plaxis) uitgevoerd zouden worden voor meerdere dwarsdoorsneden. Bovenop de oorspronkelijke doorsnede (km 69.490) werden nog vier bijkomende doorsneden doorgerekend. Aangezien elke doorsnede iets andere te verwachte deformaties opleverde, en er bovendien langs de voorgevel reeds een forse differentiële zetting was opgetekend, werd het noodzakelijk geacht om de (contractueel vereiste) tweedimensionale toetsingsmethodiek te verlaten en een driedimensionale beschouwing te maken, waarbij het metselwerk van het bestaande stationsgebouw volledig gemodelleerd werd.



Figuur A.9 / 3D-model bestaande stationsgebouw.

Door driedimensionele opgelegde vervormingsscenario's in te voeren onder de fundering van dit metselwerkmodel kon men de spanningen in het metselwerk bepalen, alsook de kans op scheurvorming en de respectieve locaties van de verwachte scheurvorming.



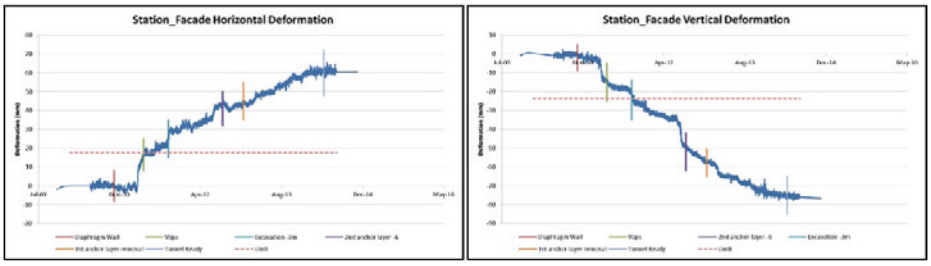
Figuur A.10 / 3D-model bestaande stationsgebouw met vervormingsscenario's.

Deze predictieberekeningen werden meermaals aangepast op meetdata en ervaringen van eerdere stappen in het vervolgproces, en uitvoering kon pas doorgaan nadat een 'go' was gegeven in een go/no-go-overleg met alle stakeholders.

A.4.3 Monitoring vervolgproces

Om alle bewegingen van het gebouw nauwkeurig te kunnen volgen, werden bestaande meetpunten heel intensief gemonitord. Bovendien werden scheurwijdtemeters bij de bestaande scheuren in de vloer binnen het gebouw aangebracht.

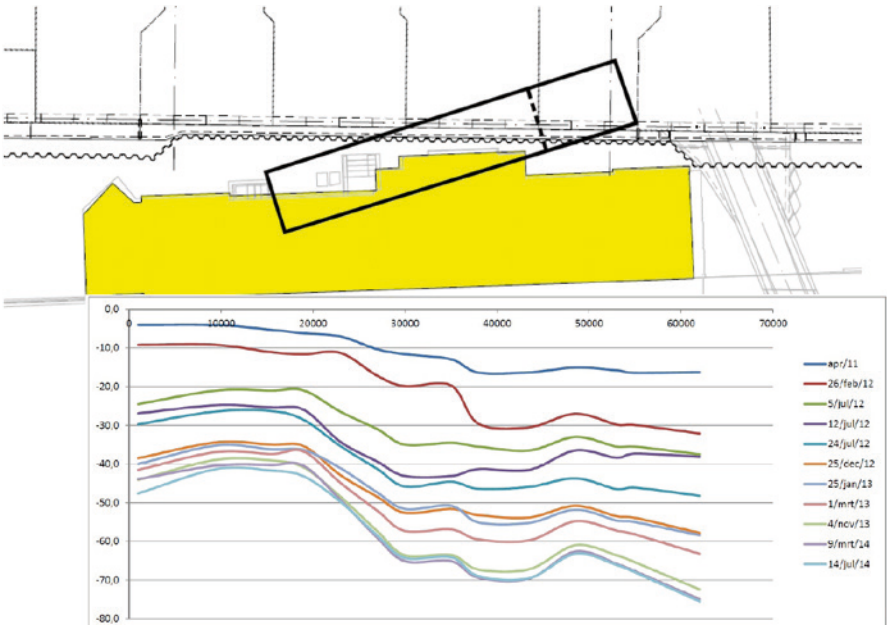
Alle uitvoeringsstappen werden van noord naar zuid uitgevoerd, zodat een soort observational method (eigenlijk meer een '*best way out*'-methodiek) toegepast kon worden. In FIGUUR A.11 zijn de deformaties bij einde werk weergegeven.



Figuur A.11 / Deformaties bestaande stationsgebouw bij einde werk.

Ondanks het feit dat de uiteindelijke deformaties (60 millimeter horizontaal en 76 millimeter verticaal) een veelvoud waren van de oorspronkelijk berekende waarden, werd er nergens schade aan het gebouw opgetekend. Dit is enerzijds te danken aan het feit dat het gebouw in de richting loodrecht op de bouwput vooral translatie en tilt onderging, waarbij dus eerder kleine spanningen in het metselwerk optraden, en anderzijds aan het feit dat de relatieve hoekverdraaiingen en rekken in de langsrichting van het gebouw onder de waarden van de toetspolynoom van een 'geel' gebouw bleven.

In het gehele uitvoeringsproces is getracht om de hoekverdraaiingen en rekken in langsrichting van het gebouw zo veel mogelijk te beperken door het doorvoeren van steeds strengere bijkomende mitigerende maatregelen. De nadruk lag hierbij vooral op het beperken van de zettingen van de zuidoostelijke hoek. Uit FIGUUR A.12 mag blijken dat dit tot januari 2013 min of meer gelukt is, maar dat de deformatie van de meest noordelijke 20 meter van het gebouw dermate veel 'achterliep', dat de relatieve hoekverdraaiing net voorbij deze zone de meeste zorgen baarde. Momenteel verkeert CCL nog steeds in de overtuiging dat de voormalige fundering (zie zwarte rechthoek) van een gebouw uit het tijdperk voor de oprichting van het bestaande stationsgebouw mede de oorzaak is van dit sterk differentieel vervormingsgedrag. Achteraf-priksonderingen hebben niet kunnen aantonen dat er nog funderingsresten aanwezig waren, maar misschien is de heraanvulling of de oorspronkelijke lokale grondverbetering een mogelijke oorzaak. Verschil in dieptes van de verschillende kelders onder het gebouw kunnen ook oorzaak geweest zijn van het differentieel zettingsgedrag.



Figuur A.12 / Voormalige fundering onder bestaande stationsgebouw en verloop van deformaties.

Bijlage B A2 Maastricht

B.1 Geologische beschrijving

B.1.1 Gesteenteregio's in Nederland

In Nederland komt er op enkele plekken (kalk)steen voor. De gebieden in Nederland waar gesteenten aan of nabij het oppervlak voorkomen in het bereik van een ondergronds bouwproject zijn:

1. Zuid-Limburg, ten zuiden van de lijn Heerlen-Bunde, het betreft hier:
   a. Kalksteen met hardgrounds en vuursteenbanken uit het (Boven-)Krijt-Paleoceen.
   b. Schalies (leisteen) uit het Carboon (Namuriën tussen Mechelen en Epen).
   c. Zandstenen uit het Carboon (Namuriën tussen Mechelen en Epen).
   d. In theorie kan er bij ondergronds bouwen tussen Eijsden en de Belgische grens verkarst kalksteen (Onder-Carboon en Boven-Devoon) in combinatie met schalies worden aangetroffen. Er is daar overigens sprake van brak/zout, warm (warmer dan 25 graden Celcius) spanningswater.
2. De Achterhoek tussen Vreden, Winterswijk en Kotten:
   a. Muschelkalksteen (Trias).
   b. Buntsandsteen (Trias) meestal in verweerde vorm op een enkele locatie.
   c. Jura kalksteen/zandsteen (beperkt).
   d. Onder-Krijt Bentheimer zandsteenachtig materiaal.
   e. Losser-De Lutte tot Duitse grens.
   f. Bentheimer zandsteen (onder-Krijt).

B.1.2 Maastrichtse geologie: de gevolgen van gebergtevorming (tektoniek)

Circa 450 miljoen jaar geleden botsten continenten nabij Maastricht. Het Londen-Brabantmassief ontstond, en Maastricht ligt aan de oostflank van dit gebergte, wat zich in de ondergrond uitstrekt tot diep in Engeland. Deze botsingen duren tientallen miljoenen jaren en tijdens een latere langdurige periode van gebergtevorming ontstonden de Ardennen en de Eiffel. De processen gaan nog steeds door en hier in Maastricht komt het landschap in tegenstelling tot West-Nederland steeds verder omhoog.

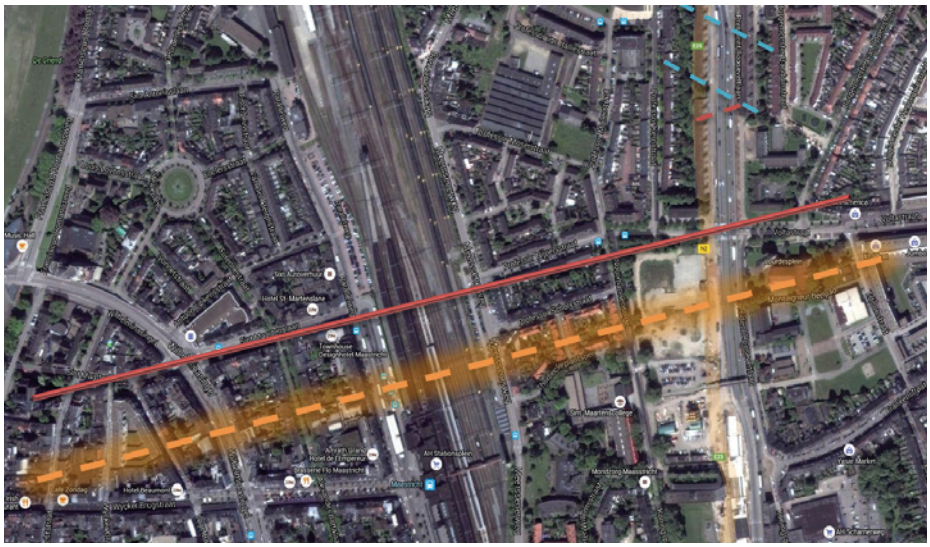
Het omhoogkomen van het gebied in combinatie met de IJstijd heeft geleid tot de vorming van het heuvellandschap in Zuid-Limburg. Door de sterke erosie van de Maas zijn hier diepe dalen ontstaan en is ruim vijfenzestig miljoen jaar oud kalksteen uit de late Krijtperiode zichtbaar rondom Maastricht. In Visé, 12 kilometer zuidelijker, steken de gesteenten uit het Carboon en Devoon uit het maaiveld naast de Maas.

Figuur B.1 / Limburgs landschap.

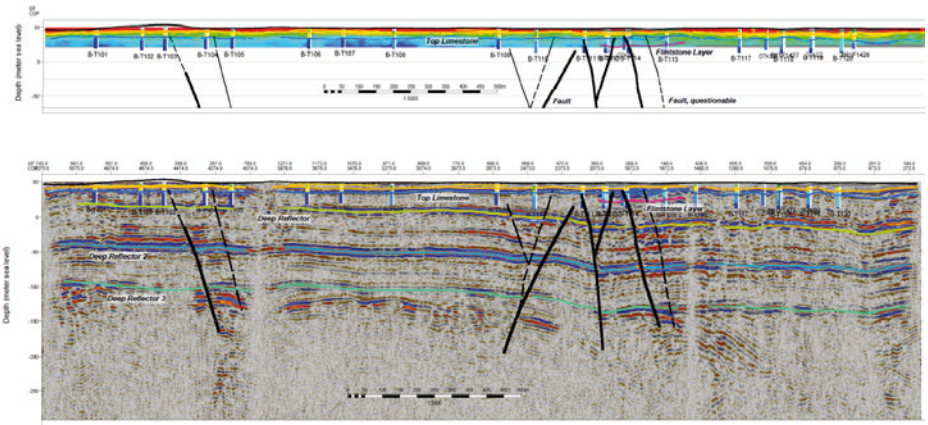
Maastricht bevindt zich geologisch gezien aan de rand van het Brabantmassief en voor een deel in het zogeheten Kempisch bekken. De gesteenten van het Carboon en Devoon bevinden zich hier op circa 100 meter diepte en zijn zeer sterk geplooid en gebroken, en nog steeds in beweging. Bovenop de hogere delen van West-Maastricht zijn leemrijke zee-afzettingen achtergelaten direct bovenop de Krijtkalken. Delen van deze fijne zeezanden (Formatie van Tongeren) zijn in de ijstijd door de Maas geërodeerd. De Maas heeft hier zeer grof grind met forse zwerfkeien achtergelaten. In het Maasdal is het grind vooral grof. In het huidige Maasdal zit er nog een kleilaag bovenop het grindpakket, en op de heuvels is een lösslaag achtergebleven.

Aan het begin van de IJstijd volgde de Maas een oostelijke koers richting Aken. Door de tektoniek van de Eiffel en Ardennen kwam het gebied nabij Vaals sterker omhoog dan Maastricht. De Maas verlegde stapsgewijs haar stroombed naar het westen en liet zogeheten Maasterrassen achter in de steeds verder omhoogkomende heuvels. De stromingsrichting van de Maas is zo geleidelijk verlegd van oost naar noord. Op den duur is de Maas letterlijk over West-Maastricht gestroomd.

De grofheid van het grind verschilt per Maasterras. Het zogeheten Oost-Maarlandterras ter plaatse van de tunnel is het grofst van allemaal en bevat de nodige zwerfkeien die destijds met ijsschotsen zijn meegedreven. Vooral de zone tussen 8 en 12 meter beneden maaiveld bevat de nodige kwartsietblokken. Deze blokken kunnen samen met vuursteenbanken in de kalksteen hindernissen vormen voor het graven van diepwanden, het intrillen van damwanden en het graafwerk in de bouwkuip. Waarschijnlijk vormt de aanwezigheid van velden met deze blokken een showstopper voor het toepassen van de cuttersoilmixmethode (CSM). Op dit moment beraadt de opdrachtnemer zich op maatregelen, want men was zich hier niet van bewust. Datering van de Krijtlagen in boringen, groeves en bouwputten laten zien dat hier geologische breukzones aanwezig zijn. In en nabij dit soort breukzones wijken de geotechnische en geohydrologische eigenschappen sterk af van de locaties die minder geplooid of gebroken zijn. Ook is de bandbreedte in sterkte en doorlatendheid nabij een dergelijke breukzone aanmerkelijk groter. Over 100 meter kan er een niveauverschil van 25 meter aanwezig zijn.



Figuur B.2 / Kaart met breuken rondom A2 Maastricht bij Lourdeskerk (noord is boven). De stippellijn is een overschuiving en de rode lijn is een afschuiving van de Grensbreuk/Faille Bordière. De blauwe lijnen markeren breukjes die de breukrichting van het Kempisch Bassin volgen, vergelijk Feldbiss (breuk in de aardkorst die door Duitsland, België en Nederland loopt).



Figuur B.3 / Refractie- en reflectieseismiekprofiel, niveaus [m+NAP] (noord is rechts). Op NAP -50 meter markeert de lichtblauwe reflector de hardrock uit het Onder-Carboon. De zwarte lijnen zijn breuklijnen nabij de Lourdeskerk aan de Voltastraat. (Bron: DMT Essen).

Bepaalde oudere lagen uit het Krijt bevatten relatief veel harde lagen in de vorm van hardgrounds en vuursteenbanken (silex), terwijl jongere lagen, afgezet in een ondiepere en warmere zee, en vanwege een slechtere cementatie, veel zachter en brosser zijn. Regenwater heeft de ruimten tussen de scheuren verder uitgespoeld, en er zijn holle ruimten ontstaan. Deze holle ruimten leiden regelmatig tot de vorming van *sinkholes* aan het maaiveld. De geologie heeft dus impact op het ontwerpen van funderingen, te nemen maatregelen en dus ook op de onderzoeksstrategie. Overigens zijn er meer regio's in Nederland die om deze reden aandacht verdienen.

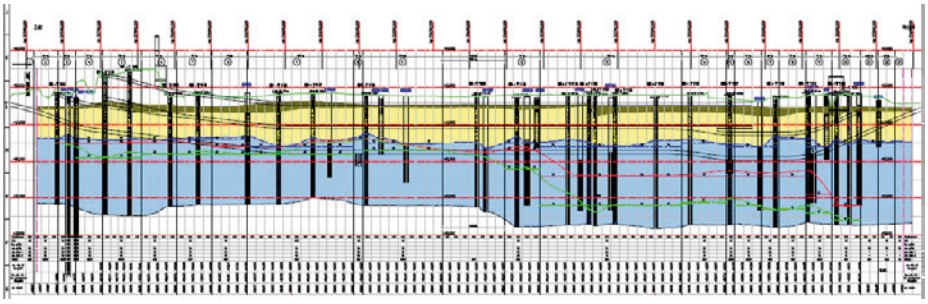
Figuur B.4 / Sinkhole als gevolg inspoeling karstgat op 10 meter diepte naast knooppunt A79/A2.

B.1.3 Geohydrologie en sterkte van kalksteen

Hedendaagse tektoniek en die uit het verleden, bepalen samen met het klimaat van destijds de geohydrologische eigenschappen van kalksteen. Grondwater stroomt nauwelijks door de poriën tussen de kalkskeletjes, maar vooral door een matrix van breuken, scheuren, karsten en langs het grensvlak vuursteen-kalksteen. De sterkte en opbouw van een kalksteenlaag is mede bepalend voor de gevoeligheid voor de chemische en fysische degradatie.

In het zuidelijke deel van de A2-tunnel zijn vooral lagen afgezet die gedurende een wat koelere en diepere Krijtzee zijn afgezet met minder turbulentie. In een koelere diepere zee verloopt het cementatieproces langzamer en beter.

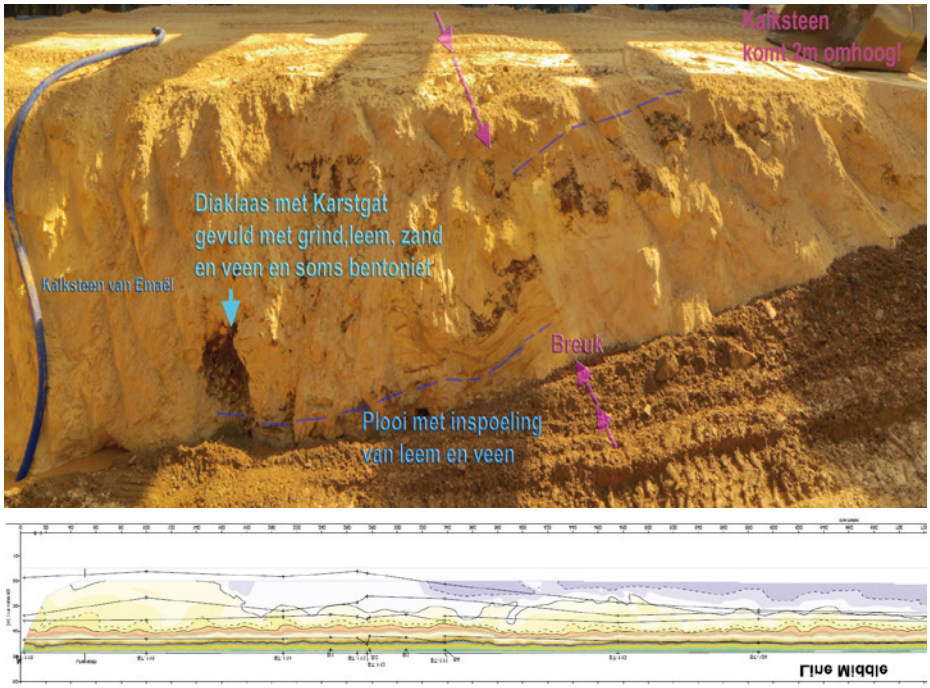
Opvallend is dat de laag 'kalksteen 3' naar het noorden duikt, zie de lichtgroene lijn in de blauwe zone in het geotechnische profiel in FIGUUR B.5.



Figuur B.5 / Geotechnisch profiel op basis van laboratoriumtesten (Erdbau Laboratorium Essen).

In kalksteen 3 zijn veel hardgrounds en vuursteenbanken aanwezig zijn. De diepte van de verwering is zeer beperkt en de horizontale doorlatendheid van deze lagen bedraagt circa 2 meter per dag. Het bleek dat de bouwkuipen ten zuiden van de kerk aan de Voltastraat een relatief geringe bemaling benodigde. Opvallend in de geologie was dat de lagen (lid van Valkenburg en Lanaye) geleidelijk onder een hoek van circa een halve graad naar het westnoordwesten hellen en op en neer golven met een amplitude van circa 1,5 meter. Deze lichte plooiing heeft geen merkbare impact gehad op de sterkte van het materiaal. Voor de kerk aan de Voltastraat is een overschuiving zichtbaar vanaf dat punt en noordelijker heeft de kalksteen veel meer geleden.

Ter plaatse van de Voltastraat is een tweede scherpe sprong in de geologie (zie FIGUUR B.6) die dusdanig is dat hier jongere kalksteenlagen bovenop liggen. Deze jongere lagen zijn in een ondiepere en warme zee afgezet waarbij cementatie snel, en de hechting dus minder goed is. Het geotechnisch profiel benoemd hier kalksteen 1: dit zijn de jongste leden van de formatie van Maastricht, namelijk de leden van Meerssen, Nekum en de bovenste helft van Emaël.



Figuur B.6 / Overschuiving Lourdeskerk, nabij boring BT110-111, en geofysisch profiel.

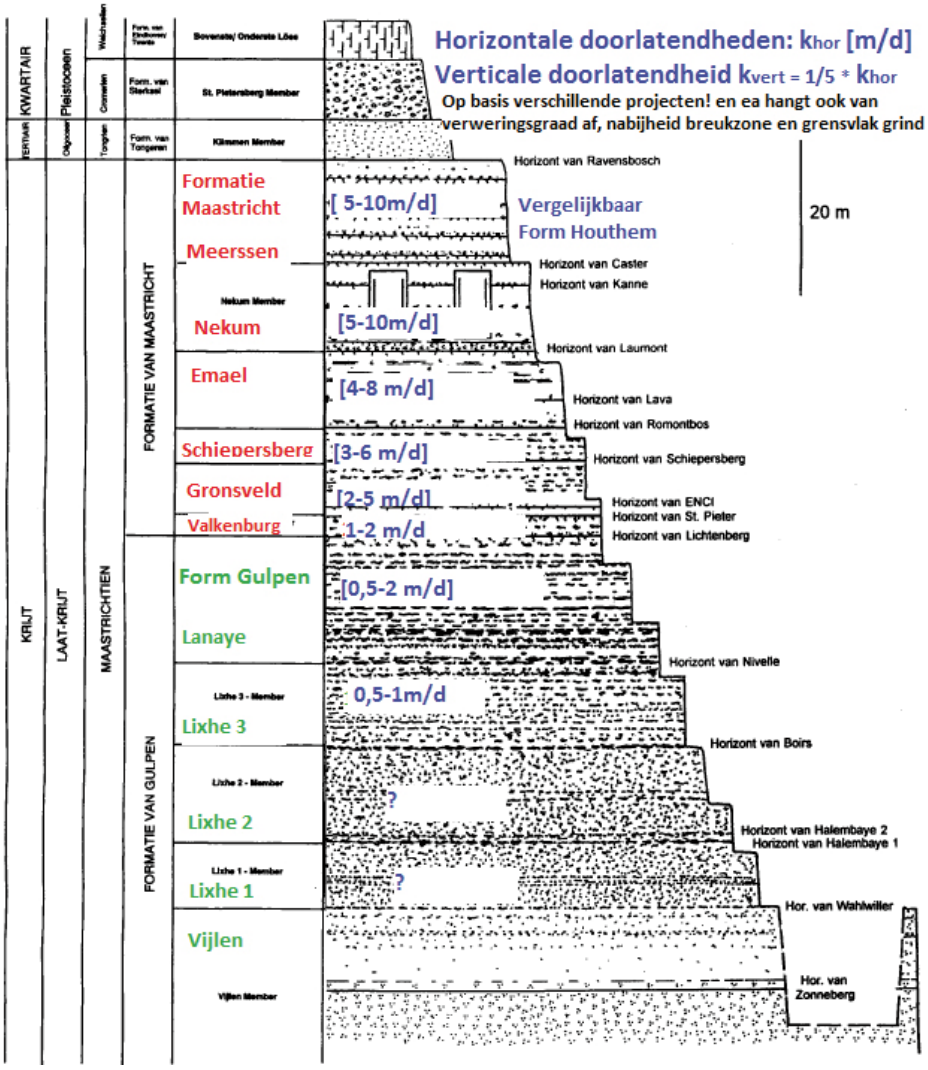
Deze lagen zijn veel gevoeliger voor degradatie door verwering. Het onderste deel van het lid van Emaël en de kalksteen van Schiepersberg vormen een sterkere overgangslaag. In beide lagen komen veel forse vuursteenlenzen voor. De kalksteen van Meerssen is vrijwel vuursteenloos en de kalksteen van Nekum bevat circa 10 procent vuursteen, maar dit zijn voornamelijk verticale elementen. Onder de kalksteen van Schiepersberg zitten de sterkere kalksteen van Gronsveld en het lid van Valkenburg, en er zijn meer scheuren in de vormen van diaklazen aanwezig.

De kalksteeneenheden 1 en 2 zijn ook zeer gevoelig gebleken voor het boorproces; dit heeft geleid tot discussie (zie eerder in dit rapport). Gedurende de afzetting van de kalksteen in het Krijt of Paleoceen hebben klimatologische en tektonische omstandigheden grotendeels bepaald wat de uiteindelijke sterkte van het materiaal zou worden.

Tabel A.1 / Watervoerende pakketten (WVP) in het Maasdal van zuidwest Zuid-Limburg, zie ook FIGUUR B.7

Ten zuiden van Borgharen	Ten noorden van Borgharen
Deklaag circa NAP +48 m: Kleiformatie van Beegden	Deklaag circa NAP +44 m: Kleiformatie van Beegden
1e WVP Grindpakket, kD-waarde 2000-7000 m/d	1e WVP Grindpakket, kD-waarde 3000-10.000 m/d
2e WVP Kalksteen, grondwaterstand circa NAP +44 m Formatie van Maastricht ontbreekt ten zuiden van Europaplein	Scheidende laag Formatie van Tongeren Ten noordwesten sluis Limmel
2e WVP Kalksteen Formatie van Gulpen	2e WVP Kalksteen Formatie van Houthem ontbreekt ten zuiden van Borgharen-Limmel
Scheidende laag, verkitte zeezanden Formatie van Vaals/Aken	2e WVP Kalksteen Formatie van Maastricht
3e WVP, stijghoogte circa NAP +60 m Verkarst kalksteen, Schalies Onder-Carboon (Souvré, Visé, Berneau)	2e WVP Kalksteen Formatie van Gulpen
	Scheidende laag, verkitte zeezanden Formatie van Vaals/Aken
	3e WVP, stijghoogte circa NAP +60 m Verkarst kalksteen, Schalies Onder-Carboon (Souvré, Visé, Berneau)

Het eerste watervoerende pakket is de Pleistocene grindlaag. De kalksteen vormt het tweede watervoerende pakket. Beide lagen liggen direct op elkaar. Ten noorden van Maastricht (vanaf stuw Limmel) bevindt zich een scheidende laag van fijn zand met glauconiethoudende klei tussen het grind en de kalksteen. Deze laag, de zogeheten Formatie van Tongeren, is door de tektoniek in combinatie met de Maas geërodeerd ter plaatse van de A2-tunnel, zodat hier geen sprake meer is van scheiding.



Figuur B.7 / Geologische opbouw kalksteen met geohydrologische eigenschappen.

B.1.4 Grondonderzoek vooraf

De grondonderzoeken die vooraf uitgevoerd zijn door opdrachtgever, waren qua methode vergelijkbaar met de latere uitvoeringsonderzoeken door opdrachtnemer. Zowel door opdrachtgever als opdrachtnemer zijn kernboringen en sonderingen verricht in de kalksteen. Er zijn geen andere methoden gebruikt. In eerste aanleg is naast een uitgebreide inventarisatie van reeds bestaand onderzoek ook gekeken naar voorbeeldprojecten in het buitenland. Deze voorbeeldprojecten zijn in Maastricht belangrijk voor de risicobeheersing in deze onbekende grondslag voor bouwend Nederland. Er is uitgezocht welke grondonderzoekstechnieken hier goede resultaten kunnen leveren en hoe met boorkernen dient te worden omgegaan om zo correct mogelijke resultaten te verkrijgen. Daarbij is voor de kennisopbouw continu contact gehouden met projecten zoals het Campusplan en het Rabobank Servatiuskantoor over uitvoering van grondonderzoek. Verder bleek hier snel dat de relatie geologie-geotechniek van evident belang is. Alle boringen zijn voorzien van stratigrafische beschrijvingen, zodat breuken en zwakkere zones voorafgaand aan de aanbesteding in beeld waren. Verder zijn rondom de breukzones een aantal geofysische metingen uitgetest. Deze testen hebben later geleid tot de keuze van de twee effectiefste methoden om het gehele tracé te onderzoeken. De kennis van vóór de aanbesteding is doorlopend gedeeld tijdens de uitvoering van het project en in aangrenzende projecten in Maastricht.

B.1.5 Grondonderzoekstechnieken

Boringen in uiterst grof grind
In Maastricht ligt er op veel plaatsen een 6 tot 8 meter dik grof-grindig pakket met stenen bovenop de kalksteen. Deze laag vergt uitvoeringskennis en het juiste materieel bij de bemonstering. Het traject tot de kalksteen dient zodanig te worden uitgevoerd dat de sterkte van de kalksteen eronder niet wordt beïnvloed. Voorkeursmethoden zijn de pulsboor of papegaaienbek en eventueel de goedkopere avegaarmethode. Die laatste is alleen geschikt indien bemonstering van het grind niet noodzakelijk is. Het toepassen van destructieve boormethoden, zoals een sonic drill, of nog ongunstiger een boorhamer (luchtdruk), om het grindpakket te doorboren, heeft de volgende nadelen:

- Deze kunnen leiden tot een forse beschadiging van de kalksteen tot 2 meter beneden onderzijde van de boring, vooral in de leden van Meerssen, Nekum en Emaël uit de formatie van Maastricht.
- Het vaststellen van het exacte niveau van het grensvlak kalksteen-grind wordt daarmee moeilijker.
- Onterecht kan de indruk ontstaan dat op de boorlocatie een verweerde zone aanwezig is in de kalksteen of dat de verwering dieper doorwerkt dan werkelijk het geval is.

Ongeacht de boormethode is het raadzaam om, gelet op de grofheid van het grind, voor een grote diameter te kiezen. Bovendien is het raadzaam om vooraf de geomorfologische en de oude geologische kaart (RGD) van het Pleistoceen te raadplegen. Deze kaarten hebben de diverse Maasterrassen van een naam voorzien. Het laagterras in Maastricht wordt aangeduid met Oost-Maarlandterras. Dit terras bevat grof grind met forse blokken. Impliciet vertelt deze kaart dat hier graafrisico's zijn en er bemonsteringsissues kunnen optreden tijdens de geotechnische onderzoeken. Ervaring heeft geleerd dat een pulsboring hier een minimale diameter van 360 millimeter vereist, anders vormen de in het grind aanwezige keien een continue rem op de voortgang op het boorproces. Een pulsboring van deze maat vergt zonder dat probleem al circa zes uur om een boordiepte van 12 meter te halen in het laagterras van Maastricht.

Boringen en gebruik van boorgaten in kalksteen
De beste boormethode in de kalksteen is de kernboring. Deze wordt in de praktijk ook wel de rotary core drilling genoemd. Boren in de kalksteen vergt 'fingerspitzengefühl' en ervaring van de boormeester.

Normaliter wordt er telkens doorgeboord tot de sampler vol is. Een opgedaan leerpunt is dat de boormeester niet alleen bij een vuursteenlaag moet stoppen, maar ook als er een hardground doorboord is. Direct daaronder begint de boormeester weer met een lege sampler. Relatief harde delen in de sampler gaan namelijk als een hobbelige schijf meedraaien en vergruizen daardoor de daaronder aanwezige zachtere kalksteen, wat zou kunnen leiden tot een verkeerde inschatting van de sterkte. Dit speelt vooral in de kalksteenlagen van Nekum, Meerssen en Emaël.

Na het boorproces moeten de boorkernen zeer voorzichtig behandeld en vervoerd worden. Hierbij moet de onderzoeker ook uitdroging en bevriezing van de boorkernen voorkomen. De monsters dienen voldoende vochtig in een doorzichtige afgedopte liner te worden opgeslagen. Doorgaans zit de liner in het boorgat. De boorvloeistof voorkomt uitdroging en verandering van sterkteparameters van het monster. Het vervoer van de monsters dient voorzichtig te gebeuren. Elke trilling heeft impact op de kwaliteit van de monsters. Overigens kan om die reden worden overwogen om boorkernen op locatie te trimmen en testen.

Voor goede sterktetesten is een kerndiameter van 100 millimeter geschikter gebleken dan 70 millimeter, ook al is de verhouding tussen het snijdend oppervlak van de sampler en de doorsnede van de boorkern voor de eerstgenoemde diameter groter en dus ongunstiger.

Indien goed uitgevoerd, kunnen boorgaten in de kalksteen het volgende opleveren:

- Pressiometertesten in het boorgat, indien een diameter van 70 millimeter wordt toegepast. Deze methode wordt veel in Frankrijk toegepast waarbij de kwaliteit van de boorkernen minder is. In Frankrijk opteert men voor snel boren en een sterktemeting in de boorwand. Pressiometertesten zijn lastig in afzettingen met heterogene sterkte en zijn vooral af te raden in zones met veel vuursteen. Deze methode is in twee boorgaten getest.
- Lokale horizontale doorlatendheid op diverse diepten door toepassing van de Lugeontest (of Lefranctest).
- De horizontale doorlatendheid van een ruimere zone waarbij het dieptebereik bepaald wordt door de filterstelling van de peilbuis; een boordiameter van 100 millimeter heeft hier de voorkeur. De methode is de zogeheten oscillatietest (*einschwingverfahren*, ESW) waarbij luchtdruk wordt toegepast. Deze methode werkt vooral goed als verontreinigd grondwater pompproeven onmogelijk maakt.
- Indien de 25 meter diepe boringen op een onderlinge afstand van 10 meter staan, opent dat mogelijkheden voor crosshole- en downhole-seismiek mits hier een boordiameter van 100 millimeter wordt toegepast en de boorbuis wordt afgewerkt tot peilbuis.

B.2 Grondwatermonitoring door opdrachtgevers

B.2.1 Inleiding

Dit is een handreiking voor projecten waar ondergronds bouwen en funderen een belangrijk thema vormt. Op het moment dat er gegraven wordt, moet er in Nederland doorgaans rekening gehouden worden met grondwater. En zelfs in hooggelegen gebieden dient in de initiatieffase onderzoek gedaan te worden naar grondwatersituatie. Het Rijk zegt niets over praktische zaken op het gebied van grondwatermonitoring, zie ook www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wetgeving-beleid/kaderrichtlijn-water/grondwater.

B.2.2 Waarom vroeg starten met verzamelen grondwatergegevens?

Veel projecten worden vaak onnodig duur doordat er voorafgaand van een project te weinig gegevens beschikbaar zijn. De onvoorziene kosten in een project zitten doorgaans in de onzekerheden. Dit levert in de ontwerpfase al veel discussie op tussen de ingenieurs van de opdrachtnemer en opdrachtgever. Al te vaak komt het gemis aan gegevens pas gedurende de uitvoering aan het licht, wat kan leiden tot stilstand. Daarnaast kan tijdens en na aanleg van het bouwwerk schade ontstaan aan de omgeving, die grotendeels voorkomen had kunnen worden.

B.2.3 Projectfasen: wanneer welke stap?

Initiatieffase project

- Zorg meteen voor ondergrond- en grondwaterexpertise binnen de organisatie.
- Inventarisaties van geologie en grondwatersituatie zijn te verkrijgen via het DINOloket (www.dinoloket.nl).
- Indien niet bekend, bedenk hoe het grondwater- en oppervlaktewatersysteem in elkaar zit. Oppervlaktewaterdata zijn opvraagbaar bij het waterschap, en van grote kanalen en rivieren ook bij Rijkswaterstaat. Laat deze meetgegevens op een kaart zetten en analyseren door een expert.

- Zoek vergelijkbare projecten in de nabijheid en vraag naar ervaringen binnen die projecten.
- Beoordeel de kwaliteit en aanwezigheid van actuele meetpunten voor de grondwaterstanden.
- Inventariseer de grondwaterbelangen van de stakeholders en bepaal welke belanghebbenden in de toekomst mogelijk de constructie kunnen beïnvloeden. En bepaal welke belanghebbenden door het project kunnen worden beïnvloed.
- Bepaal waar de gevoelige objecten in het bereik van het project zitten; het bereik van het project blijkt later uit het grondwatermodel en daarna uit verificatie van de metingen tijdens uitvoering.
- Betrek direct beheerders van grondwater en oppervlaktewater bij het project en leg het monitoringsplan en globale bouwplan voor. Bespreek of er een gevalideerd grondwatermodel beschikbaar is van het projectgebied.
- Stel toekomstscenario's op voor de verandering van activiteiten in de omgeving en het klimaat gedurende de levensduur van het project. Wat krijgt de constructie aan krachten en waterpeilen te verduren? Het waterpeil heeft een relatie met waterdruk, maar ook met het vollopen van een constructie.
- Ga na hoe de oplossing (het ontwerp) er ongeveer uit ziet en plaats het ontwerp in het ondergrondmodel.
- Bedenk in scenario's hoe het ontwerp gerealiseerd zou kunnen worden:
  - Is hier bemaling voor nodig of zijn er opties zonder bemaling? Let op: spanningsbemalingen – in afgesloten watervoerende lagen – zijn onder andere niet toegestaan vanwege de enorme reikwijdte van deze verlagingen.
  - De ingeschatte duur van de bemaling: Is er een vergunning nodig? Is de bemaling MER-plichtig? Wat betekent dit voor de projectplanning?
  - Mogelijke bouw-/aanlegmethoden.
- Bekijk op welke niveaus grondwaterstanden beïnvloed worden door het project in de bouwfase en gebruiksfase. Deze niveaus hebben te maken met de diverse watervoerende pakketten die op een locatie aanwezig kunnen zijn (raadpleeg REGIS/DINOloket).
- Beschouw de wisselwerking tussen het project, eventuele grondwaterwinningen, warmte-koudesystemen (WKO) en oppervlaktewaterpeilen.
- Verricht een transferruisanalyse voor de bekende peilbuizen in het gebied.
- Bouw een grondwatermodel, of verbeter een bestaand grondwatermodel van een hoogheemraadschap of voormalig project in de directe nabijheid van het project, en controleer of het model zich hiervoor leent.
- Verfijn het bestaande monitoringsnet op basis van het ondergrondmodel en meetnet.
- Boorbeschrijvingen voor nieuwe peilbuizen dienen ter verdere verfijning van het ondergrondmodel en grondwatermodel.
- Bedenk vooraf wat van het meetnet blijft voortbestaan na gereedkomen van het project en hoe het meetnet gefaseerd afgebouwd wordt na de oplevering van het project.
  - Tijdens uitvoering: volledige meetcapaciteit.
  - Tot een jaar na uitvoering: 30 procent meetcapaciteit.
  - Vanaf een jaar na uitvoering: minstens zes peilbuizen binnen de 5 centimeter invloedsfeercontour.
  - Langer dan een jaar na uitvoering: 10 procent van de buizen. Het kan zijn dat de buizen die vooraf aanwezig waren, ingezet kunnen worden. Dit heeft wel de voorkeur, omdat er dan trendbreuken gesignaleerd kunnen worden. Er zijn minstens vier peilbuizen nodig: twee bovenstrooms en twee benedenstrooms per object. Dit is afhankelijk van de gevoeligheid van het gebied en de situatie (zie paragraaf hierna).
- Bedenk dat grondwater een kostbaar goed is. Grondwaterlichamen die bij een bemaling een groter dagelijks debiet leveren dan 100 kubieke meter dienen gemonitord te worden.

Na aanbesteding

- Opdrachtgever handhaaft haar meetnet of, nog beter, draagt dit meetnet over aan een bevoegd gezag of onafhankelijke instantie. Opdrachtnemer van het bouwwerk regelt haar eigen monitoringssysteem om schade in en direct om het bouwterrein te voorkomen. De meetfrequentie van dit uitvoeringsmeetnet bedraagt doorgaans een meting per uur vanwege de veiligheid en adequate sturing van het bouwproces.
- Alle meetgegevens worden gedeeld met Deltares NITG-TNO, zodat iedereen online inzicht heeft via het DINOloket. Volgens de Waterwet vormt de gemeente het loket voor de burger.
- Bepaal de impact van de gekozen uitvoeringsmethode. Het succesvol verkrijgen van een Waterwetvergunning en/of de MER hangt in grote mate af van het goed doorlopen van de voorgaande stappen.

Tijdens uitvoering

De monitoring door de opdrachtnemer is niet zozeer thema van dit document. Vanuit de opdrachtgever en het bevoegd gezag dient vooral gekeken te worden (met een onafhankelijk meetnet) of de uitvoering niet meer impact heeft op de grondwaterstroming dan voorzien. Werken de maatregelen? Of zijn er nog aanvullende maatregelen vanuit het project of door derden nodig om de negatieve effecten tijdens de bouw te compenseren? Denk hier bijvoorbeeld aan het aantrekken van brak grondwater (zoutwaterintrusie), of het verlagen van de grondwaterstand in bepaalde zones die zettingsgevoelig zijn.

B.2.4 Aandachtspunten hoeveelheid gegevens

De hoeveelheid gegevens is onder te verdelen in twee soorten:

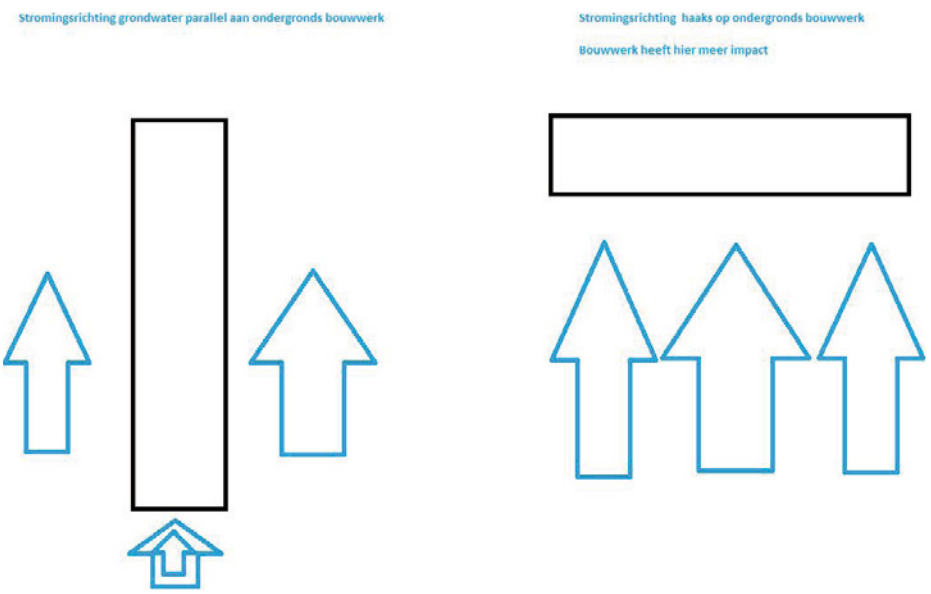
- De dichtheid van het grondwaterstandsmeetnet, dus de hoeveelheid peilbuizen.
- De duur en intensiteit van de metingen: wanneer wordt er gestart en de meetfrequentie?

Dichtheid grondwaterstandsmeetnet

De dichtheid van de metingen levert informatie op voor de stromingsrichting en stroomsnelheid van het grondwater. Deze informatie is noodzakelijk om het verspreidingsgedrag van eventueel aanwezige verontreinigingen goed te kunnen voorspellen. Verder geeft deze informatie inzicht in eventuele gevoeligheid van de omgeving indien hier een ondergronds bouwwerk is gepland. Indien de locatie in stedelijk gebied ligt, dan is er uiteraard een intensievere monitoring nodig dan in het buitengebied.

Dichtheid in relatie tot fysieke omvang bouwwerk

De fysieke omvang van een ontgraving is dé bepalende factor voor de dichtheid van gegevens die de opdrachtgever in de initiatieffase moet verzamelen. De omvang moet natuurlijk wel beschouwd worden in verhouding tot de diepte van het grondwater, de bodemopbouw en de fysische eigenschappen van deze bodem. Ook speelt mee of een watervoerende laag geheel of gedeeltelijk wordt afgesloten over een bepaalde lengte. Daarnaast zijn de zeven verschillende typelocaties voor Nederland zeer belangrijk voor de dichtheid van het meetnet. En natuurlijk is van belang of het project in de invloedssfeer zit van bebouwing, landbouw of natuur, of alle drie tegelijk. Ook de vorm speelt een rol: een tunnel is langwerpig, maar kan qua volume kleiner zijn dan een parkeergarage, en tegelijkertijd na aanleg meer impact hebben op het grondwaterregime indien deze haaks op de stroming staat. Het is lastig om vooraf eisen te stellen aan de dichtheid van de meetpunten. Toch wordt hier een poging gedaan op basis van ervaringen.



Figuur B.8 / Geometrie ondergronds bouwwerk en stromingsrichting grondwater

Omgevingssituatie, typelocaties bodemopbouw, geomorfologie gebied
Het betreft hier de eerste installatie van peilbuizen tijdens de initiatieffase; later moeten buizen bij worden geplaatst. Overigens kunnen de buizen ook worden gebruikt voor milieukundige monitoring.

Uitgangspunten van het bouwwerk bij de bepaling van de monitoringsdichtheid van het meetnet met peilbuizen:
1. Het ondergronds object heeft een opstuwende lengte van 200 meter.
2. Deze zijde van 200 meter staat vrijwel haaks op de grondwaterstroming.
3. Het freatische pakket en deklaag worden minstens voor 90 procent afgesloten.
4. Er is weinig bekend over de lokale opbouw van de bodem en grondwatersysteem.
5. Er wordt mogelijkerwijze bemalen tijdens uitvoering.
6. Het project ligt niet tegen een watergang aan of zal onderdeel vormen van een waterkering.
7. De buizen meten freatische grondwaterstanden en stijghoogten in het tweede watervoerende pakket voor onderstaande situaties. Stijghoogten onder kleilagen zijn namelijk relevant voor het bepalen van het risico op opbarsting van de bouwputbodem.

In Nederland kunnen de volgende omgevingssituaties spelen die invloed hebben op de dichtheid van het meetnet:
1. Poldersituatie diep gelegen in de zeeklei (marien gebied), waarbij het waterpeil in de watergangen en het grondwaterpeil vrijwel constant is. Hier bestaat het gevaar voor het oppompen van brak grondwater. Een raster van in totaal zes peilbuizen: twee net naast de constructie, deze bepalen ook de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket, en vier peilbuizen aan weerszijden van lange zijde op circa 100 meter van het project.
2. Poldersituatie in de veenweidegebieden, waarbij het waterpeil sterk gereguleerd is en de kans op het inklinken van veenlagen aanwezig is. Dit is het zogeheten perimariengebied, vergelijkbaar met de situatie nabij Boskoop of Woerden. Een raster van in totaal zes peilbuizen: twee net naast de constructie, deze bepalen ook de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket, en vier peilbuizen aan weerszijden van lange zijde op circa 100 meter van het project.

3. Gebieden in de nabijheid van hoogveen, zoals het Bargerveen en de Peel. Het waterbeheer in deze gebieden is vanuit de kwetsbaarheid van de natuur (veengroei) hier streng gereguleerd. Een raster van in totaal zes peilbuizen: twee net naast de constructie, deze bepalen ook de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket, en vier peilbuizen aan weerszijden van lange zijde op circa 100 meter van het project.
4. Poldersituatie met een sterk fluctuerende rivier die tijdens hoogwater de grondwaterstand en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket sterk kan verhogen, en waarin kweldruk sterk kan toenemen. Dit geldt voor de riviergebieden bovenstrooms van de terrassenkruising nabij Nijmegen, dus ook in Limburg langs de Maas tot Eijsden. Doorgaans is hier een constant grondwaterpeil, totdat hier hoogwater optreedt. Bij hoogwater pieken de grondwaterstanden sterk. Er is extra aandacht nodig voor inundaties. De kans op zettingen ligt altijd op de loer aangezien hier nog altijd veenlenzen aanwezig kunnen zijn in verlaten geulen. Een raster van in totaal zes peilbuizen: twee op of nabij de as van de te bouwen constructie, deze bepalen ook de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket, en vier peilbuizen aan weerszijden van lange zijde op circa 100 meter van het project, ook deze meten de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket.
5. Lagere zandgronden met diverse klei- en veenlagen in de bodem. De grondwaterstanden fluctueren hier sterk en er zijn veel waterlopen aanwezig. Ook hier spelen zettingen een rol. Voorbeelden zijn zandgronden tussen Waalwijk en Eindhoven. Deze situatie komt veel voor in Nederland, ook in een smalle zone bij duinen aan de kust. Een raster van in totaal zes peilbuizen: twee op of nabij de as van de te bouwen constructie, deze bepalen ook de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket, en vier peilbuizen aan weerszijden van lange zijde op circa 100 meter van het project, ook deze meten de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket.
6. Voet van hellingen zoals: Zuid-Limburg, Veluwe, Twente, Salland, Rijk van Nijmegen, Utrechtse Heuvelrug en Maasterrassen in Limburg. Deze locaties kunnen zeer lastig zijn, omdat hier diverse bodemtypen voorkomen, grondwater onder een sterk verhang stroomt en een obstructie hier in de ondergrond al snel tot permanente overlast leidt. Vooral de steden Venlo en Arnhem zijn gevoelig voor ingrepen. Let op artesisch grondwater in deze gebieden; water kan namelijk onder overdruk staan indien hier een kleilaag wordt doorgegraven. Een raster van in totaal tien peilbuizen, alle buizen meten ook niveaus onder kleilagen. Twee op of nabij de as van de te bouwen constructie, twee peilbuizen op 50 meter van de benedenstroomse zijde van de constructie, twee peilbuizen op de voet van de helling, twee peilbuizen halverwege de helling en twee bovenop het plateau. Bepaal tijdens de boring met een geoloog hoe diep de filters geplaatst moeten worden. Peilbuizen komen weerszijde van lange zijde op circa 100 meter van het project.
7. Hogere zandgronden (löss-plateaus) vergen doorgaans minder aandacht voor het project zelf; deze kunnen doorgaans zonder bemaling worden uitgevoerd. Toch moet er vooraf vastgesteld worden of er geen hangwaterzone aanwezig is. Het afpompen van hangwater kan enorme schade opleveren voor landbouw en natuur, en zelfs bronnen negatief beïnvloeden in natuurgebieden. Eén peilbuis tot 5 meter beneden het diepste punt van de verwachte constructie.

Bovenstaande lijst is niet uitputtend, maar geeft aan dat er eerst goed gekeken dient te worden naar de omstandigheden van een gebied. Schakel in ieder geval een deskundige in bij het vaststellen van het meetnet.

Bovengenoemde aantallen zijn indicatief. Indien de opstuwende lengte van een ondergrondse constructie verdubbelt, dient het aantal peilbuizen minimaal met een factor 1,5 te worden vermenigvuldigd ten opzichte van het bovengenoemde.

Doorlooptijd en meetfrequentie monitoring
Des te langer de doorlooptijd voorafgaand aan het project is, des te meer inzicht ontstaat in de ontwerpgrondwaterstanden. Lange meetreeksen geven statistisch gezien een preciezer beeld van de maximale en minimale grondwaterstanden. Als de bandbreedte van een maximale/minimale ontwerpgrondwaterstand smaller wordt door een lange meetreeks, dan beperkt dit de mate van overdimensionering van een ontwerp. Dit kan enorm veel kosten schelen. In het verleden werden grondwaterstandsmetingen met de hand gedaan en derhalve slechts eens per veertien dagen verricht. Tegenwoordig wordt er automatisch en dagelijks gemeten. Dit is zelfs voldoende voor gebieden nabij de grote rivieren, zodat er ook goed inzicht kan ontstaan van een gebied op de snel wijzigende waterstanden in een rivier. Een meetfrequentie van een meting per dag is voldoende voordat een project in uitvoering gaat.

Na projectafronding handhaaft het bevoegd gezag en de beheerder van het object het meetnet. Op basis van één evaluatiejaar bekijkt het bevoegd gezag welke peilbuizen relevant blijven. Onnodige monitoring moet voorkomen worden.

Wereldwijd zijn er circa 25.000 geautomatiseerde peilbuizen, waarvan er 23.000 in Nederland staan. U zult zien dat er altijd wel eentje in de buurt staat waarin waterstanden worden gevolgd.

Referenties

Algemeen

[1] **CUR/DC-commissie H416 (2010)**
Richtlijn meten en monitoren van bouwputten (CUR 223)
Stichting CURNET, Gouda

[2] **Geo-Impuls (2015)**
Handreiking observational method
SBRCURnet, Delft

[3] **COB-commissie F530 (2012)**
Aanbevelingen voor het ontwerp van bouwkuipen en stedelijke omgeving (F530-ER-12-49785)
Stichting COB, Gouda

Boorgedeelte Noord/Zuidlijn

[4] **Kaalberg (1999)**
Minder schade met IBBS - nieuw systeem waarschuwt tunnelboorders voor ongelukken
Vakblad Land+Water, nr.11, p.25-27

Diepe bouwputten Noord/Zuidlijn

[5] **Salet, De Kort en Crawley (2006)**
Amsterdam North-South Line metro - construction of deep diaphragm walls for three underground stations
International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam

[6] **Delfgaauw, Buykx en Bosch (2009)**
Jet grout strut for deep station boxes of the North-South metro line Amsterdam - design and back analysis
ITA-AITES World Tunnel Congress, Budapest

[7] **Driesse, Van 't Verlaat, Essler en Salet (2008)**
Grout struts for deep station boxes North-South Line Amsterdam
International Conference on Foundations (ICOF), Dundee

[8] **De Wit, Roelands en Schiphouwer (1999)**
Geotechnical design aspects of the deep underground stations in the North-South Line in Amsterdam
European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam

[9] **Cook, Kleinlugtenbelt en De Nijs (2011)**
Amsterdam Noord/Zuidlijn: the largest settlement monitoring project in Europe?
International Conference on Underground Construction, London

[10] **Cook, De Nijs en Frankenmolen (2007)**
Amsterdam Noord/Zuidlijn: use of background monitoring data prior to construction commencement
International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (FMGM), Boston

[11] **Netzel en Kaalberg (1999)**
Settlement risk management with GIS for the Amsterdam North-South metroline
ITA-AITES World Tunnel Congress, Oslo

[12] **Cook (2006)**
Robotic total stations and remote data capture: challenges in construction
Geotechnical Instrumentation News 24 (4), december

[13] **Netzel en Kaalberg (2001)**
Monitoring of the North-South metro line in Amsterdam
International Conference on Response of Buildings to Excavation-induced Ground Movements, London

[14] **De Nijs en Buykx (2010)**
Instrumentation and monitoring at deep excavation in historic city of Amsterdam - design and performance analysis of monitoring system at Ceintuurbaan station
ITA-AITES World Tunnel Congress, Vancouver

[15] **COB (2011)**
Soils, buildings and foundations in Amsterdam - background information for dataset Noord/Zuidlijn
Deltares en Witteveen+Bos, 1203958-003-GEO-0001-jvm, draft 14

[16] **COB (2011)**
Data set Rokin station
Deltares en Witteveen+Bos, 1203958-003-GEO-0004, draft 2

[17] **COB (2011)**
Data set Vijzelgracht station Noord/Zuidlijn
Deltares en Witteveen+Bos, 1203958-003-GEO-0003-sr, draft augustus

[18] **COB (2011)**
Data set Ceintuurbaan station
Deltares en Witteveen+Bos, 1203958-003-GEO-0002, draft juni

[19] **Korff en Kaalberg (2014)**
Monitoring dataset of deformations related to deep excavations for North-South Line in Amsterdam
International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Seoul

[20] **Kaalberg, Braakman en Cook (2003)**
Amsterdam Noord/Zuidlijn: one of the largest settlement monitoring projects in Europe
International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (FMGM), Oslo

[21] **Korff, De Nijs en Kimenai (2011)**
Ground and building movements during predrilling activities
International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (FMGM), Berlin

[22] **Korff (2013)**
Response of piled buildings to the construction of deep excavations
Ph.D thesis Cambridge University, Deltares Select Series, nr. 13

[23] **Bosch en Broere (2009)**
Small incidents, big consequences. Leakage of a building pit causes major settlement of adjacent historical houses. Amsterdam North-South metro line project
ITA-AITES World Tunnel Congress, Budapest

[24] **Korff, Mair, Van Tol en Kaalberg (2011)**
Building damage and repair due to leakage in a deep excavation
Institution of Civil Engineers: Forensic Engineering, nr. 164, p.165-177

[25] **Van Tol en Korff (2011)**
Deep excavations for Amsterdam metro North-South Line: an update and lessons learned
International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Rome

Spoorzone Delft

[26] **Delfgaauw, Jonker, Mastbroek en Mortier (2010)**
Four-track railway tunnel re-unifies the city of Delft in the Netherlands
ITA-AITES World Tunnel Congress, Vancouver

[27] **Buykx et al. (2012)**
Tunneling underneath a Dutch windmill
ITA-AITES World Tunnel Congress, Bangkok

[28] **Delfgaauw en Mortier (2013)**
Tunneling underneath historical buildings of Delft
International Association for Bridge and Structural Engineering Conference, Rotterdam

[29] **Delfgaauw, Everaars en Mortier (2012)**
Optimising pre-defined mitigating measures related to excavation-induced settlements by application of the observational method
ITA-AITES World Tunnel Congress, Bangkok

[30] **Van Doorn, Mortier, Van der Sluis en Zwart (2013)**
Detailing concrete structures of a top-down built urban tunnel using diaphragm walls
Structural Engineering International 23 (4), november, p. 479-488

[31] **Delfgaauw, Everaars, Kwast, Meulblok en Mortier (2011)**
Geotechnical design of a railway tunnel and an underground station supporting the new city hall, Delft, The Netherlands
DFI-TC28 congress, Rome

[32] **Giardina et al. (2013)**
Increasing allowable deformation criteria through application of level II LTSM approach
ITA-AITES World Tunnel Congress, Genève

[33] **Van Dijk, Mortier en Vriend (2014)**
Mutual influence of foundation elements and anchor pile design of a top down diaphragm wall tunnel
ITA-AITES World Tunnel Congress, Iguassu Falls

[34] **Van Doorn en Mortier (2013)**
Assuring the required remaining lifetime of a railway viaduct heavily deformed during tunnel execution
Structural Engineering International 23 (4), november, p. 468-478

[35] **Jonker en Mortier (2014)**
Tunnel dwars door binnenstad
Vakblad Cement, nr. 1

[36] **Mortier en Van der Poel (2013)**
Spoorzone Delft ondergaat totale metamorfose
Vakblad Land+Water, nr. 4

[37] **Spruit (2014)**
Ultrasoon meten spoort lekkende diepwandvoeg op
Vakblad Land+Water, nr. 5

[38] **Prakken (2015)**
Eén tunnel, verschillende bouwmethoden
Vakblad Betoniek, nr. 2

[39] **Meijers (2007)**
Settlement during vibratory sheet piling
Ph.D thesis TU Delft

A2 Maastricht

[40] **Grote en Van Dalen (2013)**
Toepassing observational method leidt tot optimaal ontwerp tunnel A2 Maastricht
Vakblad Land+Water, januari

[41] **Van Dalen en Salazar (2012)**
Bouwput A2-tunnel Maastricht - diepe ontgraving en kerende wanden in kalksteen
Vakblad Geotechniek, nr. 3

[42] **CUR Bouw & Infra/Geo-Impuls (2013)**
Richtlijn risicogestuurd grondonderzoek (CUR 247)
Stichting SBRCURnet, Rotterdam

[43] **Servais, Van Dalen en Boone (2014)**
Tunnelbouwkuip A2 Maastricht, evaluatie observational method
Vakblad Geotechniek, nr. 3

[44] **Van Dalen (2015)**
Observational method A2 tunnel Maastricht
International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR), Rotterdam

[45] **Galenkamp en Bosma (2015)**
Monitoring A2 tunnel Maastricht
International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR), Rotterdam

[46] **Felder (2002)**
Kalksteen van Limburg
TNO/NITG, Maastricht

Colofon

Dit is een uitgave van het Nederlands kenniscentrum voor ondergronds bouwen en ondergronds ruimtegebruik (COB).

Nederlands kennis**centrum** voor **ondergronds bouwen** en ondergronds ruimtegebruik

De Bouwcampus, Van der Burghweg 1, 2628 CS Delft
Postbus 582, 2600 AN Delft
085 4862 410 · info@cob.nl · www.cob.nl

Auteurs
Dit rapport is samengesteld door COB-commissie T540,
onder leiding van Karin de Haas (coördinator) en Ellen van Eijk (secretaris).

- Spoorzone Delft: Hans Mortier (voorzitter, Dimco)
- Boorgedeelte Noord/Zuidlijn: Joost Joustra (voorheen Witteveen+Bos, nu JCPM)
- Diepe bouwputten Noord/Zuidlijn: Thomas Bles en Mandy Korff (Deltares)
- A2 Maastricht: Jan van Dalen (Strukton) en Bjorn Vink (Sweco)

Reviewers
- Erwin de Jong (Geobest)

Eindredactie en opmaak
Marije Nieuwenhuizen, COB/Gryffin

Publicatiedatum
Juni 2016

Coverfoto's
YouTube/A2 Actueel, COB

Downloaden
Dit rapport is gratis te downloaden via www.cob.nl/kennisbank.

Hergebruik
Teksten uit dit rapport mogen vrij worden overgenomen, mits voorzien van een duidelijke bronvermelding. Voor hergebruik van figuren en foto's dient u vooraf toestemming te vragen van de aangegeven bronhouder. Als er geen bron is vermeld, dan kunt u terecht bij het COB.

Het COB en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van de uitgave. Toch moet niet worden uitgesloten dat er fouten of onvolledigheden in voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker. Het COB sluit, mede ten behoeve van degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens het COB en/of degenen die aan deze uitgaven hebben meegewerkt.

Ervaringen grote infraprojecten

Monitoring in de praktijk

De afgelopen jaren hebben er in Nederland enkele grote ondergrondse infrastructuurprojecten plaatsgevonden waarbij intensief is gemonitord. De vele predicties, meetdata en evaluaties vormen een schat aan informatie over de effectiviteit van metingen en maatregelen. Bovendien zijn de opgedane ervaringen zeer waardevol als aanvulling op bestaande richtlijnen. In dit rapport zijn de geleerde lessen en best practices van drie praktijkprojecten samengebracht, zodat deze in nieuwe projecten benut kunnen worden.

Binnen CUR/COB zijn in de periode 2009-2015 aanzienlijke inspanningen geleverd om duidelijke richtlijnen en aanbevelingen op te stellen voor het ontwerpen en monitoren van bouwputten in stedelijke omgeving. Bij A2 Maastricht, Spoorzone Delft en de Noord/Zuidlijn werd de monitoring uitgewerkt volgens deze richtlijnen en aanbevelingen. Ondanks het gelijke uitgangspunt, waren de monitoringssystemen en de verkregen resultaten onderling soms sterk verschillend. Op diverse punten werd geconstateerd dat de monitoring geoptimaliseerd kon worden. Experts van deze projecten hebben daarom samengewerkt met het COB om hun ervaringen openbaar beschikbaar te stellen voor alle belanghebbenden: daarmee wordt voorkomen dat de geleerde lessen uitsluitend blijven hangen binnen een select groepje van aan deze projecten verbonden mensen, en dat grote binnenstedelijke projecten in de nabije toekomst weer van begin af aan moeten beginnen.

Dit rapport gaat voor de drie prakijkprojecten uitgebreid in op de monitoringsfilosofie, de resulterende monitoringsstrategie en de (technische en procesmatige) invulling. Ook de doorgevoerde wijzigingen in het monitoringsproces gedurende de loop van het project komen aan de orde. Er is veel aandacht voor praktijkervaringen, waarbij zowel geboekte successen als tegenvallers worden besproken. Het rapport geeft daarnaast een samenvatting van de monitoringsaspecten die in alle/meerdere praktijkprojecten terugkeren en die nuttig kunnen zijn als advies naar toekomstige bouwprojecten. De publicatie is geschreven voor iedereen die aan opdrachtgever- of opdrachtnemerszijde betrokken is bij het risicomanagement van (grote) ondergrondgerelateerde projecten.

COB
· 085 4862 410
· info@cob.nl
· www.cob.nl