



Minimale zettingen tijdens aanleg metro onvermijdelijk

# Boren zon der blow-out

*De eerste tunnelboormachine van de Noord-Zuidlijn vertrekt komende week vanuit de startschacht bij station Amsterdam Centraal. Omwonenden en ondernemers vrezen verzakkingen en onbewoonbare panden. 'Wie zegt dat er geen zetting optreedt, verkoopt gebakken lucht.' Een klemmende deur is dus onvermijdelijk, maar het risico op significante schade lijkt minimaal.*

*Een kraan hijst het 50 ton wegende graafwiel voor de tweede tunnelboormachine in de startschacht.*

FOTO: DE KUBER/ANV/VOUDOS/ROOPE

## MACHINE MET SLURRY EN SCHILD

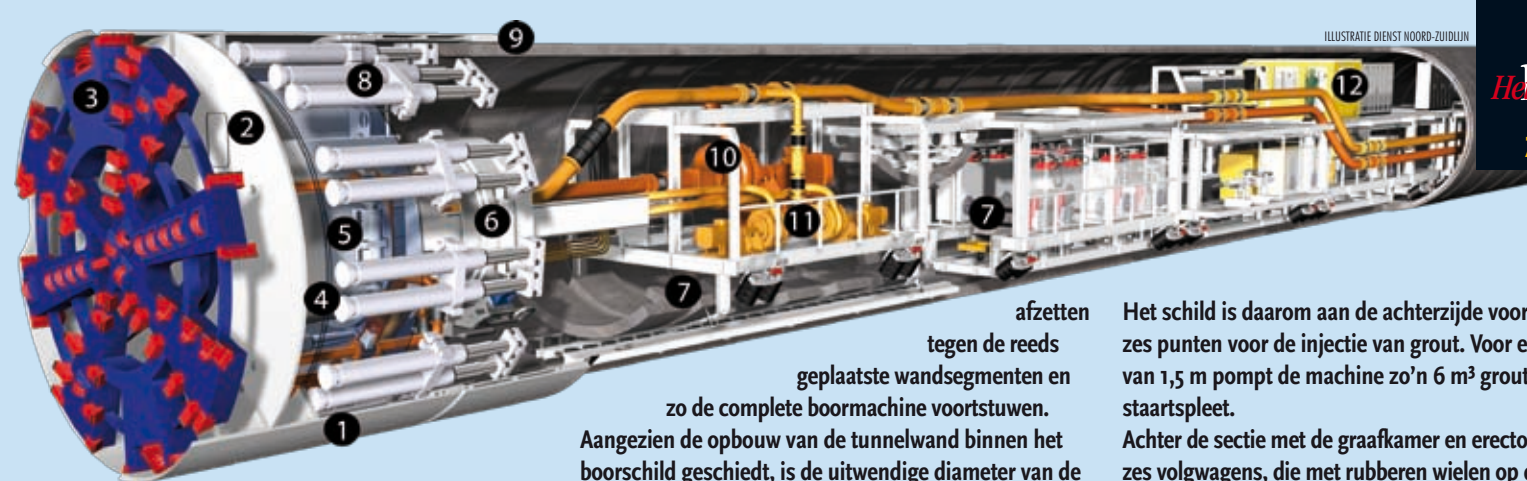
De twee boormachines die aannemer Saturn inzet voor de bouw van de Noord-Zuidlijn, zijn van het slurryschildtype. De installaties, geproduceerd door de Duitse onderneming Herrenknecht, hebben een lengte van 83 m en een massa van 870 ton. Per stuk kosten ze vijftien miljoen euro.

De voorste sectie van de machine bestaat uit een bijna 8 m lang boorschild (1). Deze cilindervormige stalen wand huisvest de eigenlijke boorinstallatie en biedt weerstand tegen de hoge grond- en waterdruk. Aan de voorzijde bevindt zich de graafkamer (2) met het graafwiel van 6,6 m in doorsnee (3), dat is voorzien

van 36 snijbeitels voor het graven in zand en klei en zeventien rolbeitels voor het doorboren van de stationswanden. De graafkamer zit tijdens het boorwerk vol met slurry. Dit bentonietmengsel staat onder druk en voorkomt dat het boorfront afkalft. De graafkamer is verbonden met de drukkamer (4), waarin een luchtbel zit die variaties in de druk enigszins opvangt. De slurry zorgt ook voor de afvoer van het afgegraven materiaal. Het mengsel wordt daarom continu rondgepompt en ververst. Via diverse openingen bovenin de graafkamer komt het bentoniet onder druk binnen en langs een uitlaat aan de onderzijde stroomt het grondmeng-

sel weg richting afvoerpomp. Bij de afvoer bevindt zich tevens een stenenbreker, die grote objecten en brokken beton moet verpulveren. Het mengsel gaat via een lange leiding naar een scheidingsinstallatie aan het IJ achter Amsterdam Centraal.

In de ruimte achter de graaf- en drukkamer bevindt zich naast de hydraulische motor (5) voor het graafwiel de zogenoemde erector (6), de installatie voor de plaatsing van de betonnen tunnelwandsegmenten. Deze elementen worden met behulp van een wagen en een geïntegreerd transportsysteem (7) aangevoerd. Elke ring is goed voor 1,5 m tunnelwand en bestaat



uit vijf gebogen blokken en een kleiner sluitblok. De segmenten hebben een dikte van 35 cm en zijn aan de zijden voorzien van waterkerende rubberen randen. Langs de schildwand zitten rond de erector 22 afzonderlijk aanstuurbare hydraulische cilinders (8), die zich

afzetten tegen de reeds geplaatste wandsegmenten en zo de complete boormachine voortstuwten. Aangezien de opbouw van de tunnelwand binnen het boorschild geschiedt, is de uitwendige diameter van de tunnel met 6,52 m kleiner dan het schild van 6,88 m in doorsnee. Het verschil vertaalt zich in een zogenoemde staartspleet (9). Zonder maatregelen zou deze spleet van bijna 18 cm zich na passeren van het schild vullen met bodemmateriaal, wat tot forse zettingen kan leiden.

Het schild is daarom aan de achterzijde voorzien van zes punten voor de injectie van grout. Voor elke ring van 1,5 m pompt de machine zo'n 6 m<sup>3</sup> grout in de staartspleet. Achter de sectie met de graafkamer en erector hangen zes volgagens, die met rubberen wielen op de tunnelwand rusten. Deze wagens bevatten onder meer de pompen voor de afvoer van het grondmengsel (10) en de aanvoer van verse slurry (11), de hydraulische pompen en het transportsysteem voor de tunnelementen. Ook de controlekamer (12) staat op een van de volgagens.

**'HET WORDT TIJD DAT WE GAAN BOREN', STELT EEN** potige bouwvakker, terwijl hij met een sigaar in de mond wacht op het liftje naar de bodem van de startschacht van de Noord-Zuidlijn nabij station Amsterdam Centraal. Hij staat duidelijk te popelen en wil de reusachtige tunnelboormachine nu wel eens zien draaien. In de 15 m diepe bouwput legt een aantal technici de laatste hand aan de installatie, die met zijn graafwiel van 6,6 m in diameter al tegen de kopse wand van de schacht staat. De eerste set tunnelsegmenten ligt klaar op een wagen van de volgtrein. Twee van de zes volgagens staan naast de boor, omdat de startschacht met zijn toch 60 m lengte te kort is voor de complete machine van 83 m. Deze laatste twee wagens, met onder meer de ventilatieapparatuur, koppelen pas aan wanneer de boor al een eind op weg is. Ook de tweede tunnelboormachine, die de westelijke buis gaat maken, krijgt al vorm. Het boorschild, graafwiel en de aandrijving staan reeds klaar.

Het boren van twee metrotunnels in de slappe hoofdstedelijke bodem geldt als een van de meest complexe klussen van de Noord-Zuidlijn. De nieuwe metroverbinding met acht haltes, die overigens al volgend jaar had moeten rijden, maar nu

volgens de planning najaar 2017 – veertien jaar na de aanvang van de bouw – klaar zal zijn, verbindt het Buikslotermeerplein in het noorden van de hoofdstad met het reeds bestaande treinstation Amsterdam Zuid. Van het 9,7 km lange tracé ligt 7,1 km ondergronds. Onder het oude stadscentrum worden twee tunnels met een uitwendige diameter van 6,52 m en een lengte van 3,1 km geboord. De overige ondergrondse secties, waarvan een groot deel al klaar is, zijn vanaf het maaiveld met een open bouwput aangelegd.

### BIJENKORF

De keuze voor boren onder een historisch en op slappe grond gebouwde stad is door velen bekritiseerd en met het oog op eventuele zettingen als uiterst riskant bestempeld. Niet iedereen deelt dan ook het enthousiasme van de bouwvakkers. Geruststellende woorden van de gemeentelijke Dienst Noord-Zuidlijn, positieve beoordelingen door buitenlandse experts en stapels rapporten ten spijt vrezden veel omwonenden en ondernemers verzakkingen, scheurende gevels en onbewoonbare panden. Zo eiste warenhuis de Bijenkorf, dat aan het tracé ligt, vorige maand nog opschorting van de boorwerkzaamheden omdat de voorzorgsmaatregelen niet afdoende zouden zijn. Na crisisoverleg werd besloten toch door te gaan.

De zorgen zijn goed te begrijpen, want de bouwwerkzaamheden leidden in het verleden al enkele keren tot verzakkingen. Bij de bouw van station Vijzelgracht ging het al tweemaal mis en raakte een aantal woonhuizen zwaar beschadigd. Door een lekke diepwand van het in aanbouw zijnde station verzakte medio 2008 een woningblok ruim 20 cm en moest vervolgens worden ontruimd. De diepwandconstructies bleken kwalitatief ondermaats, terwijl deze bouwmethode door de projectorganisatie als standaard en veilig werd gepresenteerd. Het vertrouwen is mede door deze incidenten nog steeds ver te zoeken.

Anders dan toen speelt de Dienst Noord-Zuidlijn nu open kaart en geeft aan dat ondergronds bouwen per definitie altijd risico's met zich meebrengt. Ook tijdens het boren van de twee tunnels kunnen mogelijk zettingen optreden. 'Het zal waarschijnlijk gepaard gaan

met enige zetting van de bodem', zegt ir. Paul Janssen van de Dienst Noord-Zuidlijn. De contractmanager Boren, nu twee jaar betrokken bij de bouw van de metrolijn, spreekt uit ervaring, want eerder werkte hij onder meer aan de spoortunnel onder het Pannerdensch Kanaal en de Hubertustunnel, beide boorprojecten. 'Wie zegt dat er geen zetting optreedt, verkoopt gebakken lucht', bevestigt prof. ir. Jan Maertens, die de Amsterdamse plannen in het verleden als extern expert tegen het licht hield. De Belgisch bouwkundige was nauw betrokken bij de nieuwe spoortunnel onder het centrum van Antwerpen, die zonder noemenswaardige incidenten is aangelegd. 'De risico's zijn echter veel kleiner dan bij de bouw van diepwanden', zegt hij, verwijzend naar de incidenten bij station Vijzelgracht.

Gevraagd naar de voornaamste technische uitdagingen van het graafproces schaarft boormanager Janssen zetting onder de categorie 'kwaliteit', die naast 'tijd' – het boren mag niet voor nog meer vertraging zorgen – en 'veiligheid' bovenaan de agenda staat. 'Kwaliteit valt uiteen in twee delen. In de eerste plaats betreft het de tunnel zelf: als er geen scheuren in de wandsegmenten ontstaan, heeft Amsterdam uiteindelijk een kwalitatief hoogwaardige metrobus, die zeker honderd jaar en waarschijnlijk veel langer mee kan. Het tweede gaat het bij kwaliteit om de beïnvloeding van de omgeving. Met een beetje stof, herrie en trillingen valt wel te leven, maar waar iedereen voor vreest zijn zettingen.'

Het is cruciaal onderscheid te maken tussen incident- en proceszettingen. De eerste hangen samen met eventuele defecten, menselijke fouten of onregelmatigheden in de bodem en zijn zodoende onvoorzien, terwijl de tweede inherent zijn aan het bouwen van een tunnel met een boormachine. In Amsterdam gebruikt aannemer Saturn, een samenwerkingsverband van Dura Vermeer en de Duitse onderneming Züblin, een slurryschildmachine. Aan de voorzijde van deze installatie bevindt zich het 8 m lange boorschild, een zware stalen cilinder die weerstand biedt aan de hoge grond- en waterdruk. Binnen het schild vindt het eigenlijke graafwerk plaats en worden



FOTO: DE BIJENKORF/WOLFGANG HOOGE

de segmenten van de tunnelwand geïnstalleerd. Het graafwiel bevindt zich in een graafkamer, die vol zit met boorspoeling, een mengsel van water en bentoniet, en reeds verwijderd bodemmateriaal. Direct achter de graafkamer volgt de drukkamer, die grotendeels met lucht is gevuld en waar dezelfde druk heerst. De boorspoeling wordt continu rondgepompt. Verse bentoniet suspensie stroomt de graafkamer binnen, terwijl het mengsel samen met de afgegraven grond wordt afgevoerd. Via een leiding stroomt de slurry naar een scheidingsinstallatie, die onder meer vanwege de forse geluidsproductie achter Amsterdam Centraal aan het open water staat.

De slurry in de kamer speelt een cruciale rol bij het boorproces. Het mengsel zorgt namelijk voor tegendruk, waardoor het boorfront intact blijft. De druk in de graafkamer is hiertoe idealiter even groot als de water- en gronddruk direct buiten de machine, zodat er sprake is van een evenwichtssituatie. Zetting van de bodem zou hiermee theoretisch uitgesloten zijn, maar in praktijk blijkt het exact regelen van de druk lastig. 'De slurrydruk is nooit precies gelijk aan de water- en gronddruk, omdat de soortelijke massa van water, grond en

Achter Amsterdam Centraal staat de scheidingsinstallatie van de boormachine.

Lees verder op pagina 24.

Lekkages in de diepwanden van station Vijzelgracht zorgden voor grote zettingen. Uit voorzorg wordt de grond bij de diepwandvoegen nu bevroren.



FOTO: SATURN

## TUNNELDUO

In Amsterdam komen twee metrotunnels naast of boven elkaar te liggen. Om de zettingstrog van de boormachine goed te laten zien, is de tweede tunnel in deze illustratie niet afgebeeld.

puin, zand, klei en veen

klei en slap veen

eerste zandlaag

tussenlaag

### Amsterdams bodem

De Amsterdams bodem bestaat uit drie zandlagen die geschikt zijn voor fundering. Tussen de zandlagen liggen klei- en slappe veenlagen. Oude gebouwen in de binnenstad staan op houten palen, die tot in de eerste zandlaag reiken (circa -13 m). Palen van nieuwe gebouwen reiken tot de tweede zandlaag (1) (-18 tot -28 m NAP).

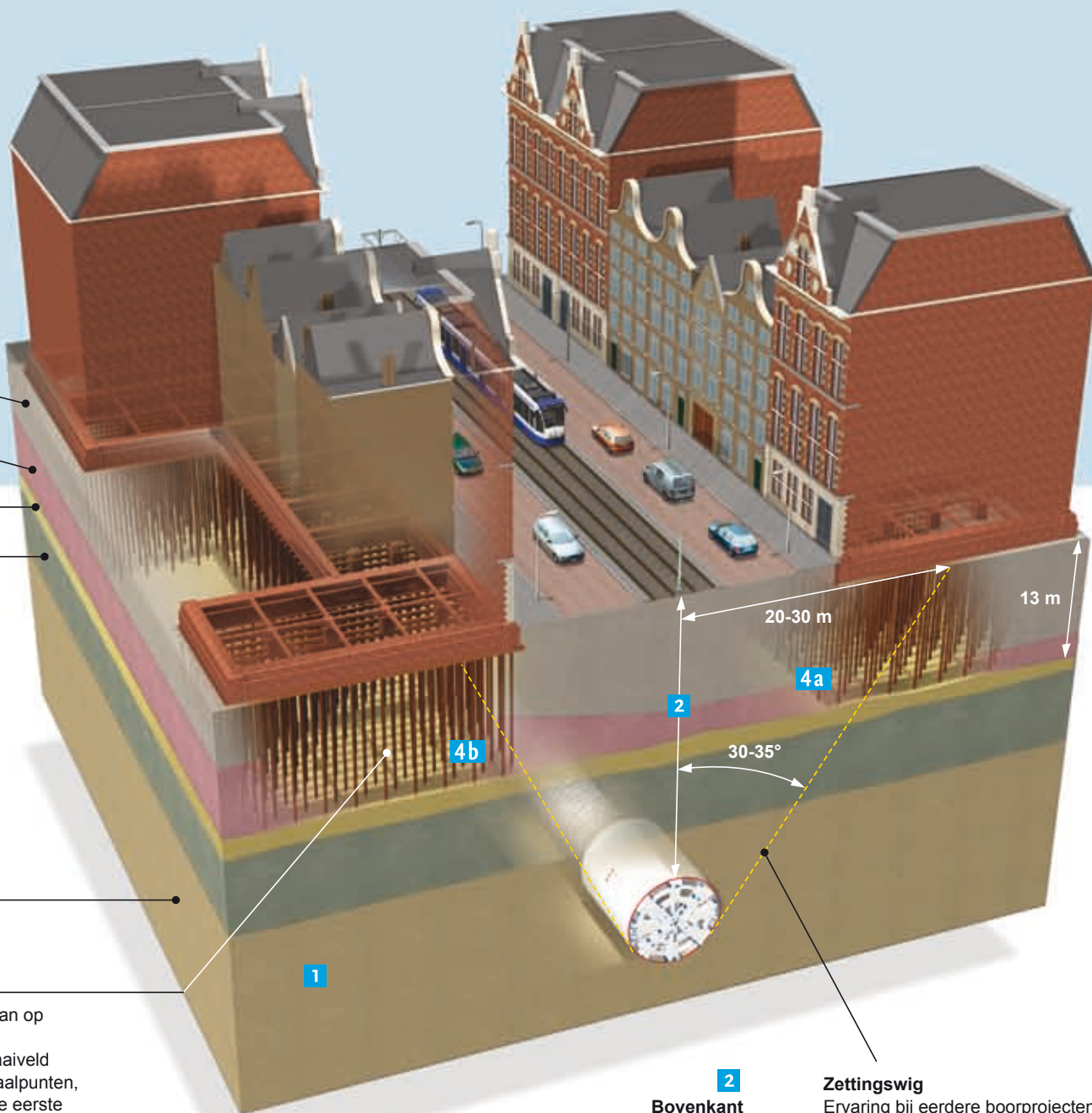
### Paalfundering

Alle panden in Amsterdam staan op palen, waardoor zettingen en hoekverdraaiingen aan het maaiveld geringe invloed hebben. De paalpunten, die op de meeste locaties in de eerste zandlaag zitten, dragen 80 % van de belasting. Wrijving tussen het paaloppervlak (over de volle lengte) en de grond levert de overige 20 %.

dwarstrog

## ZETTINGSSCHADE

Zettingen van de bodem zijn inherent aan het boren van een tunnel in slappe grond. Door deze zettingen kan schade ontstaan (lichte scheurvorming in wanden en klemmende deuren en ramen) aan panden die in het invloedsgebied van de tunnelboormachine staan.



**2**  
Bovenkant boormachine  
13 tot 30 m onder NAP

### Zettingswig

Ervaring bij eerdere boorprojecten wijst uit dat zettingen optreden in een wigvormig gebied boven de boormachine. Dit resulteert in een trog achter de boor met, afhankelijk van de tunneldiepte, een breedte van 40 tot 60 m. Precies boven de machine treedt de grootste absolute zetting op.

### Zettingen in de diepe bodem

De tunnelboormachine boort op een diepte van ongeveer -15 tot -30 m NAP. Wanneer de paalpunten zich in het wigvormige gebied bevinden (4a) waarin zettingen optreden, kan dit tot relatief grote verzakkingen leiden. De wighoek, de boordiepte en de afstand van bebouwing tot de boor bepalen of dit het geval is. Volgens de Dienst Noord-Zuidlijn kan deze situatie nergens optreden (4b), ook niet in het meest ongunstige geval waarbij de metro zeer dicht langs bebouwing loopt.

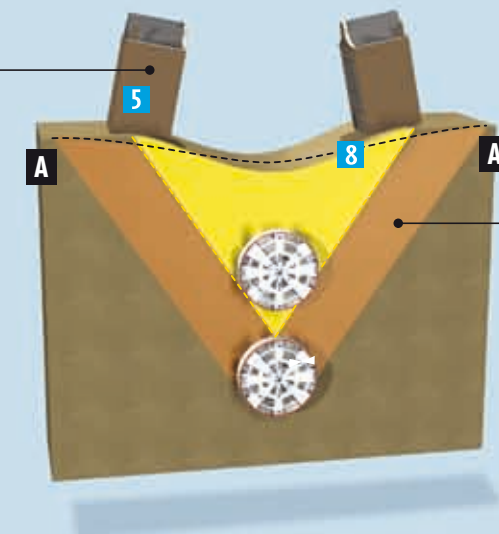
**3**  
zettingszone voor de boormachine

## HOEKVERDRAAIINGEN

Schade aan panden ontstaat met name als een gebouw scheef zakt. De dwarstrog levert permanente hoekverdraaiingen (5) op. De langstrog zorgt voor verdraaiingen op het moment dat de tunnelboormachine passeert (6). Dit effect is tijdelijk.

## MAXIMALE ZETTING

De absolute zetting boven de tunnel bedraagt naar verwachting maximaal 30 mm (7). De Dienst Noord-Zuidlijn hoopt de tunnel echter met kleinere zettingen aan te kunnen leggen. In de illustratie zijn de zettingen honderd keer groter weergegeven dan in werkelijkheid het geval is (op schaal van de boormachine).



## BOORDIEPTE

Een grotere boordiepte levert een bredere trog op, maar de zettingen en de hoekverdraaiingen aan het maaiveld worden juist kleiner (8). Het verdwenen grondvolume rondom de boormachine wordt immers opgevangen door een groter gebied.

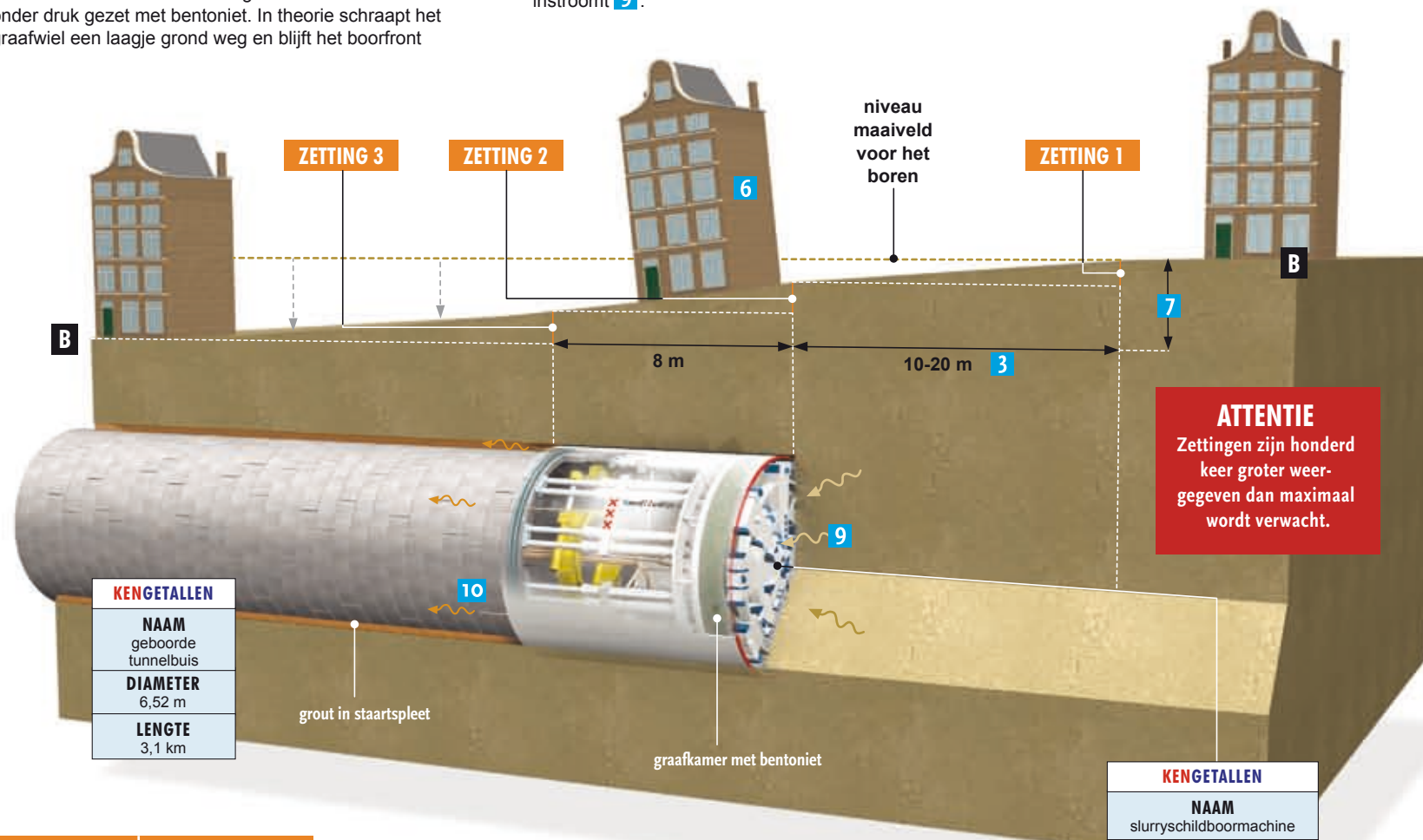
**ZETTING 1** 20 % van de totale zetting

### ZETTING VOOR DE BOOR

Het graafwiel bevindt zich in de graafkamer. Deze kamer is van de rest van de machine gescheiden en wordt onder druk gezet met bentoniet. In theorie schraapt het graafwiel een laagje grond weg en blijft het boorfront

(= de afgegraven grondwand voor het graafwiel) staan. De druk van de bentoniet voorkomt dat het boorfront instort. In praktijk is de bentonietdruk niet gelijk aan de grond- en waterdruk over het boorfront waardoor er grond het graafwiel instroomt (9).

Dit effect heeft tot gevolg dat er al vóór de machine vervorming in de ondergrond, en dus aan het maaiveld, plaatsvindt. Op circa 10 tot 20 m voor de boormachine kunnen hierdoor geringe zettingen optreden.



KENGETALLEN	
NAAM	geboorde tunnelbuis
DIAMETER	6,52 m
LENGTE	3,1 km

KENGETALLEN	
NAAM	slurryschildboormachine
DIAMETER BOORSCHILD	6,88 m
DRAAISNELHEID GRAAFWIEL	max. 3 omw./minuut
SNELHEID	8-10 m/24 h

**ZETTING 2** 20 % zetting

### ZETTING ROND BOORSCHILD

Het 8 m lange boorschild heeft een licht conisch verloop zodat de boor met minder kracht door de grond kan worden geduwd. De diameter is aan de achterkant 1 cm kleiner dan aan de voorzijde. Dit volumeverlies zorgt voor zetting over de lengte van het boorschild.

**ZETTING 3** 60 % van de totale zetting

### ZETTING ACHTER DE BOOR

De tunnelbuis heeft een kleinere diameter dan het boorschild. Hierdoor ontstaat een spleet tussen het boorgat en de tunnelementen van circa 18 cm (staartspleet). Via zes injectiepunten wordt onder hoge druk grout tussen de betonnen segmenten en de gatwand geïnjecteerd (10) om de staartspleet op te vullen. Het volume grout is nooit exact gelijk aan het verlies aan volume en het materiaal verspreidt zich niet geheel gelijkmatig over de omtrek, waardoor er zettingen optreden.

illustratie & tekst: Eric Verdult  
www.kennisinbeeld.nl © 2010

## STATIONS GEREED VOOR ONTVANGST

De boorplanning is vorig jaar in verband met de vertraagde bouw van de stations Rokin en Vijzelgracht gewijzigd. Oorspronkelijk zouden de twee boormachines vanaf de startschacht nabij station Amsterdam Centraal direct naar het eindpunt van de tunnel bij het Europaplein gaan. 'Om de tussenliggende stations te passeren moeten deze boorontvangstgereed zijn', vertelt ing. Gerard Scheffrahn, contractmanager Diepe Stations bij de Dienst Noord-Zuidlijn. 'De stations dienen volledig te zijn ontgraven, de vloer moet er inzitten.' Om te voorkomen dat de vertraging bij de diepe stations ook het boorproces ophoudt – Rokin en

Vijzelgracht zijn de eerste haltes na de startschacht – is besloten eerst de twee tunnelbuizen tussen Amsterdam Centraal en Rokin te bouwen. De boormachine, die volgende week vertrekt, graaft de oostelijke buis. In juni of juli komt de installatie bij Rokin aan, waar de machine tegen de diepwand wordt geparkeerd. Saturn haalt vervolgens de volgtrein terug en plaatst de volgwagens achter de tweede boorkop. Hetzelfde boorteam, dat in drie ploegen steeds diensten van twaalf uur draait, start in augustus of september met de westbuis. Nog voor het eind van



De kopse zijde van de start-schacht is voorzien van een brilwand. Deze constructie heeft een waterkerende functie en garandeert de integriteit van de wand.

het jaar moet ook de tweede tunnel tussen Amsterdam Centraal en Rokin klaar zijn. De inzet van hetzelfde team heeft als belangrijk voordeel, dat de ervaring opgedaan bij het

boren van de eerste buis optimaal wordt benut bij de bouw van de tweede verbinding. Gelijktijdig met de aanleg van de tweede tunnel wordt de geparkeerde boormachine grotendeels ontmanteld. Deze onderdelen worden overgebracht naar de oorspronkelijke eindschacht op het Europaplein ten zuiden van het centrum, waar een nieuw schild klaarstaat. Alleen het boorschild, graafwiel en hoofdlager blijven bij Rokin achter. De diepwand wordt later van binnen uit doorbroken, waarna de achtergebleven componenten worden verwijderd. Vanuit het zuiden vertrekt de eerste boor begin 2011 richting station Ceintuurbaan en Vijzelgracht om medio

2012 uit te komen bij Rokin. De vertraagde stations moeten tegen die tijd boorontvangstgereed zijn. De tweede boor-machine gaat medio 2011 aan de slag en arriveert eind 2012 bij Rokin. Passage van de stations is een klus op zich en vergt de nodige logistieke coördinatie. Om het voor de boormachines mogelijk te maken zich een weg door de betonnen wanden te banen, zijn de kopse zijden van de stations plaatselijk van speciale wapening voorzien. In plaats van stalen korven zitten er glasvezelstaven in de diepwanden. Aan de binnenzijde is de wand tevens voorzien van een zogeheten brilconstructie, bestaande uit twee stalen ringen met een diameter net

iets groter dan het boorschild. Deze constructie moet in de eerste plaats de integriteit van de wand garanderen wanneer de twee gaten erin worden geboord. Daarnaast moeten de brilringen op het moment dat een boormachine doorbreekt water en grond tegenhouden. Hiertoe heeft elke ring aan de binnenzijde twee opstaande rubberen randen, die om het boorschild heen vallen. Na doorbraak vangt een speciale waterdichte trommel de boorinstallatie op, waarna het geheel met behulp van luchtkussens naar de tegenoverliggende wand wordt gebracht. Deze wand is eveneens voorzien van een brilconstructie en glasvezelwapening.

slurry verschillen', vertelt Dr.-Ing. Holger Netzel, directeur en medeoprichter van geotechnisch adviesbureau CRUX Engineering. Hij promoveerde vorig jaar aan de TU Delft op een onderzoek naar de zettingsrisico's van tunnelboren en is recentelijk door de Dienst Noord-Zuidlijn ingeschakeld voor advies ten aanzien van zettingsproblematiek bij de nieuwe metrolijn. Voordeel van de slurryschildinstallatie ten opzichte van andere machinetypen is dat de

**'De metrobuis kan zeker honderd jaar mee'**

luchtbel in de drukkamer fluctuaties in de druk enigszins opvangt. De kamer fungeert zodoende als een soort expansievat. 'Geavanceerde regeltechniek in de machine bewaakt de druk in de graafkamer continu. Variaties in de diepte en grondgesteldheid vereisen voortdurend bijsturen om de optimale tegendruk in de graafkamer te krijgen.' De boorploeg heeft een fulltime taak aan het regelen van de juiste instellingen van de boormachine. 'De ploeg bepaalt voor een belangrijk deel de prestaties van de machine. In praktijk zijn dan ook variaties in de kwaliteit en zettingen aanwijsbaar die zich laten terugvoeren op de expertise en ervaring van de bemanning.'

Ondanks dat de luchtbel drukverschillen zo goed mogelijk probeert op te vangen, vindt er als gevolg van het drukverschil in de graafkamer en de omringende bodem al vóór de machine vervorming in de ondergrond plaats. Deze vervorming plant zich wigvormig voort vanaf het boorfront tot aan het maaiveld. Afhankelijk van de diepte van de tunnel kunnen hierdoor op 10 tot 20 m voor de boor al geringe zettingen optreden. Dit effect is verantwoordelijk voor ongeveer 20 % van de totale zetting, die bij nor-



maal bedrijf van de machine ontstaat. De tweede zettingscomponent, die grofweg ook 20 % van het totaal voor zijn rekening neemt, hangt samen met de vorm van het boorschild. 'Het schild heeft een licht conisch verloop om de weerstand langs de machine te reduceren. Het zou anders überhaupt niet lukken de machine door de grond persen', vertelt Netzel. 'Aan de achterzijde is de diameter 1 cm kleiner dan aan de voorzijde, wat een verlies aan volume oplevert en daarmee tot zetting leidt.'

Het belangrijkste is de zogeheten staartspleet, gemiddeld goed voor 60 % van de resulterende zetting. De tunnelwand, die binnen het boorschild wordt gebouwd, heeft logischerwijs een kleinere uitwendige diameter dan de stalen schildconstructie, die de diameter van het boorgat bepaalt. Zonder maatregelen vult deze spleet, die 18 cm bedraagt, zich aan de achterzijde van het schild met zand of klei. De injectie van grout in de ruimte tussen de betonnen segmenten en het stalen schild moet dit voorkomen. Hiertoe zitten er op de achterrand van het schild zes injectiepunten, die het grout onder hoge druk continu in de staartspleet pompen. Het injecteren is geen sinecure, want het materiaal verdeelt zich niet vanzelf over de spleet. 'Langs de omtrek treden variaties in de druk op, waardoor het grout zich niet automatisch gelijkmatig verspreidt', licht de Belgische expert Maertens toe. 'Hier is echter al veel ervaring mee opgedaan, ook in Nederland. Goede metingen van de druk in de spleet en aansturing van de injectie zijn essentieel.'

Deze drie componenten resulteren in het ontstaan van een zogeheten zettingswig, een vervorming van de grond boven de tunnel met, gezien in lengterichting, een wigvormige doorsnede. Het volumeverlies in de bodem levert op maaiveldniveau een trog op, die afhankelijk van de tunneldiepte 40 tot 60 m breed is. Het diepste punt ligt precies boven de metrobuis. 'De absolute daling van het maaiveld is overigens niet direct rele-

vant. Als alles keurig rechtstandig zakt, is er niets aan de hand', zegt prof.dr.ir. Han Vrijling, hoogleraar Waterbouwkunde aan de TU Delft en als projectcommissaris voor de Noord-Zuidlijn een luis in de pels van de projectorganisatie. 'Schade aan belendende panden ontstaat door hoekverdraaiingen, die spanning in gevels en constructies opleveren. Het gaat daarom niet alleen om de absolute zetting, maar ook om het verloop van de trog. De grote boordiepte levert een hele brede trog op, waarmee de hoekverdraaiingen relatief klein blijven.' Naast de verdraaiing ten gevolge van deze zogeheten dwarstrog, die een permanent karakter heeft, doen zich ook hoekverdraaiingen voor op het moment dat de tunnelboormachine passeert. De zetting geschiedt immers niet plotsklaps, maar geleidelijk over de lengte van de boorinstallatie. Deze hoekverdraaiingen verdwijnen weer zodra de machine voorbij is.

De diepe ligging, waaraan overigens wel een prijskaartje hangt, is een bewuste keuze voor het Amsterdamse project en biedt enige speelruimte. Op 20 tot 30 m diepte zit de boormachine in de tweede zandlaag of in het onderliggende pakket eemklei. De funderingspalen van bijna alle Amsterdamse panden staan in de eerste zandlaag op zo'n 13 m diepte. Hoewel zand vanwege de homogene samenstelling en korrelstructuur het fijnste boort, heeft de sterk waterkerende eemklei enigszins een vertragend effect op eventuele zettingen. Het materiaal heeft zo veel cohesie dat het niet direct vervormt.

### STUKADOOR

'De boorwerkzaamheden en de daarbij wellicht optredende proceszettingen zijn geoptimaliseerd op het voorkomen van significante schade aan panden langs het tracé', legt Janssen van de Dienst Noord-Zuidlijn uit. Hiermee is niet gezegd dat er geen schade kan ontstaan. 'Maar het gaat dan om eenvoudig te herstellen schade, zoals een scheur in het pleisterwerk of een klemmende deur. Oplossing: een stukadoor en een blokschaaf. De maximale hoekverdraaiing is zodanig dat deze constructieve schade uitsluit. De absolute zetting boven de tunnel bedraagt maximaal zo'n 30 mm. Dit klinkt misschien veel, maar de metrobuizen komen bijna overal onder de straat te liggen, waar de impact van 30 mm gering is.'

De maaiveldzetting is in de Amsterdamse situatie bovendien niet heel relevant, omdat alle panden op palen staan. Wat zich in de bodem afspeelt is van groter belang. In het geval dat de zettingstrog op zo'n 13 m diepte tot aan de punten van de funderingspalen reikt, zijn de gevolgen veel drastischer. De



paalpunten dragen namelijk tot 80 % van de belasting. Dit zou vooral op plaatsen waar de metro dicht langs bebouwing loopt kunnen spelen. Op verschillende locaties langs het tracé zijn mede om deze reden preventieve maatregelen genomen met zogeheten *compensation grouting*-techniek. Bij *compensation grouting* wordt vanuit een verticale schacht een groot aantal leidingen horizontaal onder de palenfundering van een gebouw geplaatst. Deze leidingen zijn elke meter voorzien van een kleine opening waardoor redelijk nauwkeurig onder hoge druk grout in de bodem is in te brengen. 'Zettingen laten zich door de injectie van grout opvangen. Het grout drukt de bodem weer iets omhoog', legt expertisemanager dr.ir. Adam Bezuijnen van geotechnisch kennisinstituut Deltares, uit. Deze week promoveerde hij aan de TU Delft op een studie naar de compensatietechniek. 'Een groot aantal injectiepunten is cruciaal om lokale zettingen tegen te gaan. Wanneer de boormachine langskomt, wordt op basis van metingen aan de fundering bepaald of en waar groutinjecties nodig zijn. Belangrijk is een continue meting, omdat het pand steeds op hetzelfde niveau moet blijven.'

Hoe een gebouw precies reageert op de injectie van grout, laat zich moeilijk voorspellen. De injectie-installaties zijn daarom in Amsterdam al beproefd, waarbij de panden enkele

Vanuit verticale schachten zijn onder een aantal gebouwen lansen geplaatst voor de injectie van grout, dat zettingen moet tegengaan.

**'Als alles keurig rechtstandig zakt, is er niets aan de hand'**



Speciale meetstations langs het tracé moeten zettingen registreren.

## STOPPEN IS GEEN OPTIE

Plannen voor de bouw van een noord-zuidmetro in Amsterdam bestaan al sinds 1968. In datzelfde jaar is de aanleg van de Oostlijn, die het stadscentrum verbindt met stadsdeel Zuidoost, goedgekeurd. Het ondergronds deel van deze verbinding werd vanaf het maaiveld gebouwd, zodat een groot aantal historische panden rond met name de Nieuwmarkt moest wijken. De publieke opinie keerde zich tegen het project en de bouw leidde zelfs tot omvangrijke rellen. Politici meden daarna het woord 'metro' en de eventuele aanleg van een tweede lijn angstvallig. Het idee van een noord-zuidverbinding werd eind jaren tachtig toch nieuw leven ingeblazen

en na een uitgebreide serie studies keurde de gemeenteraad het plan in 1996 goed. De keuze voor geboorde tunnels onder het oude centrum leverde van meet af aan veel kritiek op. De toen relatief nieuwe techniek zou zich niet lenen voor toepassing in een slappe ondergrond en de risico's zouden niet te overzien zijn. Met het oog op de risico's heeft het projectbureau Noord-Zuidlijn in de periode 1997-2002 verschillen proeven uitgevoerd bij andere boorprojecten in Nederland. Op basis van deze tests achtte de gemeentelijke organisatie de risico's verantwoord en besloot Amsterdam in 2002 definitief tot de bouw van de nieuwe

metrolijn. De 9,7 km lange verbinding zou in 2011 klaar moeten zijn en werd op 1,46 miljard euro begroot. De bouw ging in 2003 van start. De werkzaamheden verliepen in eerste instantie, op enkele kleine lekkages in diepwanden en zettingen aan het maaiveld na, voorspoedig. Wel bleken de planning en de begroting te optimistisch. De opleverdatum schoof gestaag op en de kosten stegen enkele malen met honderden miljoenen. Echt mis ging het in juni 2008 bij de bouw van station Vijzelgracht. Een van de diepwanden bleek lek, waardoor water en grond de bouwput binnenstroomden en enkele panden fors verzak-

ten. Na onderzoek en herstel van de diepwand werden de werkzaamheden ruim twee maanden later hervat. Een dag later trad weer een lekkage op, waarbij zes woningen meer dan 20 cm verzakten. De incidenten leidden wederom tot extra kosten en de bouw kwam grotendeels stil te liggen. Verantwoordelijk wethouder Tjeerd Herrema trad voorjaar 2009 af. Gelijktijdig ging een commissie onder leiding van oud-minister prof.dr. Cees Veerman aan de slag. Centraal stond de vraag hoe het project vlot te trekken en of de bouw überhaupt moest doorgaan. Stoppen is geen optie, concludeerde de commissie. Wel adviseerde Veerman onder meer de

bouwvolgorde van de boortunnels te veranderen en extra geld te reserveren voor tegenvallers. Daarnaast pleitte de commissie voor een reorganisatie, die nu goeddeels is doorgevoerd. Tussen de verantwoordelijk wethouder en de Dienst Noord-Zuidlijn, die de rol van opdrachtgever bekleedt, staat nu een commissariaat dat de voortgang zowel technisch als financieel continu kritisch toetst. De opzet is vergelijkbaar



De bouw van de Oostlijn leidde in 1968 tot rellen op de Nieuwmarkt.

met een BV en geldt als Nederlandse primeur voor een groot project als de Noord-Zuidlijn. De verbinding moet volgens de planning nu eind 2017 gereed zijn en is momenteel begroot op 3,1 miljard euro.

millimeter zijn opgekrikt. 'Het blijft een techniek van trial-and-error. De Amsterdamse bodem is een zeer dicht pakket, waardoor een groutinjectie bijna direct effect heeft. Overigens is de impact niet 1:1. Het volume te injecteren grout is ten minste vijfmaal groter dan het verloren volume in de bodem.' Behalve de Bijenkorf zijn ook twee andere panden aan de Dam, het Randstadgebouw, de Munttoren, een appartementencomplex, een aantal woonblokken en een brug van groutlansen voorzien. 'Cosmetische schade' sluit Janssen echter niet uit. Dit hangt deels samen met de typisch Amsterdamse gevel, waarin vaak veel glas zit wat de panden gevoelig maakt voor spanningen. Daarnaast hebben veel gebouwen natuursteen in de gevel, wat nog minder spanningen kan opvangen. 'Dit geldt bijvoorbeeld voor de Bijenkorf. Dergelijke panden staan daarom hoog op de gevoeligheidslijst. Het gaat daarbij altijd om kans maal gevolg. Voor de Bijenkorf bleek de kans op schade relatief groot, omdat het warenhuis dicht op het tracé staat, zwaar is en een lange gevel met veel glas en natuursteen heeft, zodat uiteindelijk tot compensation grouting is besloten. 'Maar het is heel goed mogelijk dat de compensation grouting-installaties helemaal niet nodig blijken', stelt Janssen. 'De 30 mm-zetting is namelijk echt de bovengrens. Het zou

een tegenvaller zijn wanneer deze zetting ook daadwerkelijk optreedt. Tijdens het boorproces is namelijk veel bij te sturen en te optimaliseren. Een goede informatiepositie en interpretatie van meetgegevens is hierbij onontbeerlijk. Bij vergelijkbare boorprojecten in bijvoorbeeld Hamburg, waar de tunnel dwars onder bestaande, oude gebouwen loopt, bedroeg de maximale zetting slechts 8 mm.'

Wanneer de boormachine eenmaal goed draait, lijken de risico's beperkt. 'Als alles goed gaat, gebeurt er niets', aldus Vrijling. Het zijn vooral onvoorziene zaken, met mogelijk incidentzettingen tot gevolg, die de Dienst Noord-Zuidlijn zorgen baart. Als er iets fout loopt, komt dit meestal door menselijk handelen, verwacht Janssen. 'Improvisatie is funest en moet daarom zo veel mogelijk worden voorkomen.' De oplossing ligt voor de hand. 'Checklists, procedures, draaiboeken, afvinken; het klinkt allemaal heel kinderachtig, maar het werkt wel. Vergelijk een boormachine met een vliegtuig: het is een enorm complex apparaat.' Draaiboeken en checklists zullen de installatie echter niet geheel vrijwaren van defecten, maar vergroten wel de kans dat het personeel de juiste beslissingen neemt.

Naast menselijk falen en mechanische mankementen kunnen onbekende onregelmatigheden in de bodem tot incidenten leiden. Hoewel de tunnels bijna overal dieper komen te liggen dan de funderingen reiken, is het niet uitgesloten dat bijvoorbeeld een vergeten sonderstang zich op het pad van de boor bevindt. In het ergste geval zorgt een onregelmatigheid tot een zogenoemde blow-out. Hierbij ontsnapt de boorvloei-stof, de slurry, via een weerstandarm pad in de bodem naar de oppervlakte met drukverlies in de graafkamer tot gevolg. De onstabiele situatie die daar het gevolg van is, kan leiden tot in-



Een impressie van station Vijzelgracht na voltooiing.

een blow-out doet zich voor in de laatste meters voor een stationswand. 'Het grondpakket direct langs de diepwanden is tijdens de bouw van het station verstoord, waardoor het mogelijk minder weerstand biedt voor de druk in de graafkamer.' Daarnaast boort de machine een diepwand praktisch altijd onder een hoek aan, wat het graafproces compliceert.

*'Het zou tegenvallen als de zetting van 30 mm werkelijk optreedt'*

In het geval van een blow-out is het essentieel de overdruk in graafkamer zo spoedig mogelijk te herstellen, vertelt Janssen, gevraagd naar te nemen maatregelen. 'Bestel direct een betonwagen en stort het gat waarlangs het bentoniet ontsnapt dicht. Vervolgens is het zaak de graafkamer weer vol te pompen met bentoniet.' Een snelle respons geldt bij alle mogelijke incidenten als cruciaal. 'Het boorproces ongepland stilleggen is de slechtst denkbare maatregel. Want in het geval van een blow-out ontstaat uiteindelijk een nieuw evenwicht. Wellicht is dit niet de meest optimale situatie aan het maaiveld,

maar voor het boorproces dient eenvoudigweg met deze nieuwe balans te worden gewerkt. Stoppen en buitenlandse experts invliegen is funest.' ●

### INTERNETBRONNEN

[www.noordzuidlijn.amsterdam.nl](http://www.noordzuidlijn.amsterdam.nl)

De website van de Dienst Noord-Zuidlijn.

[www.saturnvof.nl](http://www.saturnvof.nl)

Saturn, een combinatie van Dura Vermeer en het Duitse Züblin, is de hoofdaannemer van de boorwerkzaamheden.

[www.cruxbv.nl](http://www.cruxbv.nl)

Geotechnisch adviesbureau CRUX Engineering geeft advies over zettingsproblematiek.

[www.janmaertens.com](http://www.janmaertens.com)

Prof. Jan Maertens treedt op als onafhankelijk adviseur voor de Noord-Zuidlijn.

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)

Kennisinstituut Deltares voerde onder meer studies uit naar de lekkages bij station Vijzelgracht.

Ceintuurbaan is van de drie diepe stations het verst gereed. Een aantal lagen van de vloer is reeds gestort.



FOTO: J. BUREAU/PHOTOWIS/HOUTE