

Metro Amsterdam: Vortrieb eines innerstädtischen Tunnels in schwieriger Geologie und unter sensibler Bebauung

Dipl.-Ing. Wolf Friedemann, Dipl.-Ing. Axel Hillebrenner, Dr. Peter-Michael Mayer
Ed., Züblin AG, Stuttgart

1 Allgemeines

Der Bau der neuen Metrolinie in Amsterdam, die sogenannte Noord/Zuidlijn Amsterdam, ist ein herausforderndes und vielseitiges Tunnelbauprojekt in innerstädtischer Umgebung. Der Amsterdamer Baugrund mit seinen wechselnd geschichteten Lockergesteinsböden, die zu beherrschenden Wasserdrücke bis zu 3,2 bar und das innerstädtische Umfeld mit seiner dichten, vielfach setzungsempfindlichen historischen Bebauung, die fast durchweg in unmittelbarer Nähe zur bzw. direkt über der Tunneltrasse auf Pfählen gründet ist, definieren einen wesentlichen Teil der schwierigen Rahmenbedingungen für dieses Projekt. In diesem Artikel wird auf die Erfahrungen eingegangen, die im Zuge der TBM-Vortriebsarbeiten für die zwischen den Stationen liegenden Tunnelröhren gewonnen wurden.

Die Projekttrandbedingungen erforderten spezielle Lösungen, die in Zusammenarbeit mit allen am Bau Beteiligten erarbeitet und ausgeführt wurden. Um eine kritische Beeinflussung der innerstädtischen Bebauung zu verhindern, wurden ein optimiertes TBM-Maschinen- und Vortriebskonzept erstellt sowie für die Stationen speziell abgestimmte Ein- und Ausfahrvorgänge ausgeführt.

Im Zuge des Vortriebs wurden zudem zahlreiche Gebäude und Brücken durch Hebungsinjektionen gesichert

Keywords: Schneidraddesign, abgeschottetes Sohlsegment, Schild Transfer System, Kompensationsinjektionen

1.1 Projektüberblick

Die Noord/Zuidlijn Amsterdam (NZL) verbindet die Wohngebiete im Norden mit dem Wirtschaftszentrum im Süden von Amsterdam und unterfährt dabei das historische Zentrum. Das von der Gemeinde Amsterdam beauftragte Projekt weist eine Gesamtstrecke von ca. 9 km auf. Mittels verschiedener Bauweisen werden bzw. wurden komplexe Stationsbauwerke, Tunnel- und Trog- und Streckenabschnitte in offener Bauweise sowie Absenktunnel und Tunnel mittels Schildvortrieb realisiert. Der Fokus des Artikels liegt auf den zwei im Mixschildvortrieb hergestellten Tunnelröhren, die in einem Streckenabschnitt direkt im Zentrum der Stadt liegen. Diese zwei Tunnelröhren mit einem Außendurchmesser von 6,52 m und einer Länge von jeweils 3,2 km verbinden die Stationsbauwerke Centraal Station (Damrak), Rokin, Vijzelgracht, De Pijp (Ceintuurbaan) und Europaplein (Scheldeplein), siehe Bild 1. Der Bau dieser Tunnelröhren und zugehöriger Bauwerke (9 Kompensationsinjektionsmaßnahmen aus Schächten, 9 Querschläge und 4 Notausstiegsschächte) wurde durch

die Arge Saturn, einer Arbeitsgemeinschaft bestehend aus der Ed. Züblin AG und Dura Vermeer Groep NV, erbracht.

Die Besonderheiten bei diesem Projekt liegen im zu Setzungen neigenden Baugrund, der setzungsempfindlichen Bebauung, den engen innerstädtischen Platzverhältnissen und den zu wählenden komplexen Bauverfahren, die für die Beherrschung des Baugrunds erforderlich waren.

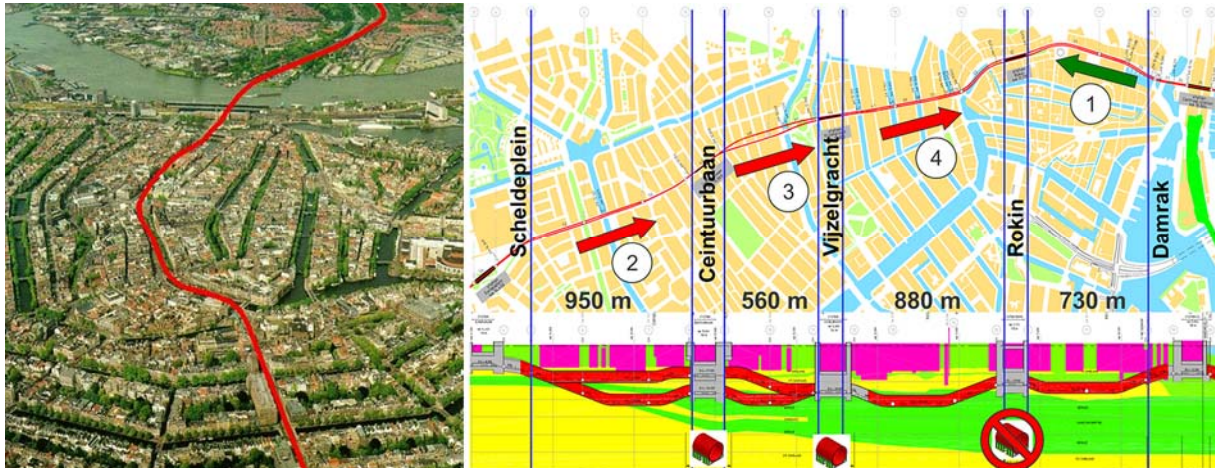


Bild 1: Projektübersicht, Trassenverlauf im Amsterdamer Zentrum (links), Einzelvortriebe zwischen den Stationen, geologischer Längsschnitt, Stationspassagen (rechts)

So stellen die mehr als 1.500 Gebäude, die im Einflussbereich der Tunnelröhren liegen, eine besondere Herausforderung dar, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Es handelt sich zum Teil um denkmalgeschützte, historische Gebäude, welche auf Holzpfehlen gegründet sind und teilweise erhebliche Vorsetzungen aufweisen.

Der Amsterdamer Baugrund ist im Wesentlichen horizontal geschichtet aufgebaut. In den oberen Schichten dominieren Auffüllungen und weiche, schluffige Klei-Schichten. Darunter, in den tragfähigeren tieferen Lagen, in denen auch die Tunnelröhren zum Liegen kommen, sind es Sande und Kleie. Der weiche Baugrund ist aufgrund des hohen Grundwasserstandes und der bereichsweise hohen Durchlässigkeit des Bodens stark setzungsempfindlich.

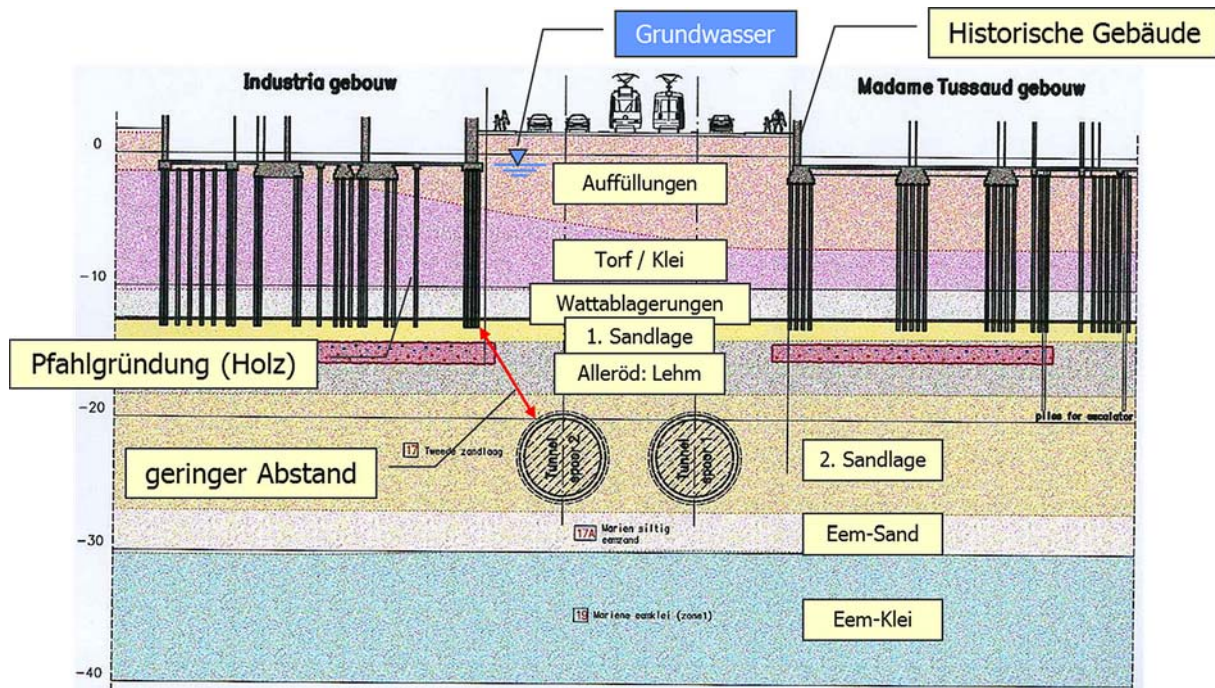


Bild 2: Bodenaufbau in Amsterdam

Um das Setzungsrisiko generell zu vermindern, wurde der Trassenverlauf der Tunnelröhren größtenteils unter den weniger setzungsempfindlichen Straßen gewählt. Infolge der dichten Bebauung ergaben sich dadurch Kurvenradien von bis zu 200 m. Trotzdem waren stellenweise Hebungsinjektionen zum Ausgleich der Vortriebssetzungen erforderlich.

In Bereichen mit besonders enger Bebauung, z.B. beim Stationsbauwerk Ceintuurbaan, konnten die Tunnelröhren nicht wie üblich nebeneinander angeordnet werden, sondern mussten übereinander hergestellt werden. Für die untere Röhre bedeutete dies eine Tiefenlage von ca. -35 m unter NAP (Normalpegel Amsterdam). In diesem Bereich wurden somit keine Querschläge zwischen den Tunnelröhren hergestellt, sondern erfolgten Flucht und Rettung durch Notausstiegsschächte.

Die engen Platzverhältnisse im Bereich der Stationen und die großen Tiefenlagen erforderten besondere Maßnahmen für die Start- und Zielvorgänge der TBM-Fahrten. Dies wirkte sich auch auf die Baulogistik aus. Da die Baustelleneinrichtungsflächen im Zentrum auf ein Minimum zu beschränken waren, wurden die Transporte teilweise per Schuten über Flüsse und Kanäle abgewickelt und mussten z.B. große Entfernungen zur Separierung vorgesehen werden.

Der Vortrieb der Tunnelröhren wurde im Dezember 2012 erfolgreich beendet. Im nachfolgenden Artikel wird auf die bei dieser komplexen und herausfordernden Baumaßnahme gewonnenen Erfahrungen im Vortrieb eingegangen

2 Maschinen- und Auffahrkonzepte

Die sandigen und kleiigen Bodenschichten sowie der hohe Grundwasserstand erforderten den Einsatz eines Mixschildes mit einem Außendurchmesser von 6,88 m (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).



Bild 3: Mixschild Herrenknecht S-268

Im Vorfeld der Projektausführung wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber detaillierte maschinentechnische Voruntersuchungen durchgeführt, bei denen die Minimierung der Setzungen beim Schildvortrieb im Vordergrund stand.

Es werden folgende Elemente beschrieben, welche die Kernpunkte dieser Voruntersuchungen darstellten, in die auch aktuelle Projekterfahrungen einbezogen wurden:

- Kurzer Schild
- Schneidraddesign
- Abgeschottetes Sohlsegment
- Verpressung der Schildspur

2.1 Kurzer Schild

Die Länge und die Konizität des Schildmantels haben einen direkten Einfluss auf Setzungen, die vortriebsbedingt entstehen. Daher wurde für Amsterdam ein sehr kurzer Schild mit einer Länge von nur 4,75 m eingesetzt. Um dies zu ermöglichen, wurden die Vortriebszylinder als Teleskoppresen ausgeführt und die Schleuse in den Schildstahlbau integriert.

Das zur Verfügung stehende Pendelvolumen der Stützflüssigkeit in der Druckkammer wurde durch den kurzen Schild minimiert, was das Risiko von Stützdruckschwankungen und damit

von Ausbläsern erhöhte. Aus diesem Grunde wurde neben der standardmäßig eingebauten pneumatischen Druckluftregelanlage (Samson Anlage), welche den Luftpolsterdruck regelt, eine zweite elektronische Regeleinrichtung integriert.

Durch die dort integrierte Überwachungsfunktion konnte die Stabilität der Stützdruckregulierung sichergestellt werden. So konnten beispielsweise Korrekturen verhindert werden, welche die voreingestellten Grenzwerte überschritten oder auf fehlerhaften Niveaueingangssignalen basierten.

2.2 Schneidraddesign

Bei der NZL mussten beide TBMs neben den zur Verklebung neigenden Kleiformationen auch Sande, Bodenverfestigungen, Dichtblöcke sowie 8 Stationswände mit Festigkeiten von bis zu 60 N/mm² und Dicken von 1,50 m durchfahren.

Während zur Durchörterung der Stationswände und Bodenverfestigungen ein eher steifes, massives Schneidrad mit umliegender Felge und ausreichender Bestückung mit Schneidrollen benötigt wird, ist bei Böden mit Verklebungsneigung ein offenes Schneidrad mit wenig Angriffsfläche und Schälmesserbesatz besser geeignet.

Das Schneidrad wurde als Flächenschneidrad mit vier Hauptarmen und vier Nebenarmen ohne Felge ausgeführt. Werkzeugbestückung und Fördermöglichkeiten waren auf den Betrieb mit 2 Drehrichtungen ausgelegt, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Die Anzahl der Schneidrollen wurde auf 15 Stück mit 12 Zoll 2-Ring Schneidrollen begrenzt. Hierdurch wurden die Schleuszeiten für den Tausch der Schneidrollen und das Verklebungsrisiko minimiert.

Zur Reduzierung von Setzungen sollte das Schneidrad bündig in die Schildschneide zurückgezogen werden können. Um dennoch bei der Durchörterung der Stationswände oder bei den engen Kurvenradien von 200 m genügend Überschchnitt zu erreichen, konnte durch Ausfahren des Schneidrads und mittels zweier hydraulischer Überschneider ein Überschchnitt von bis zu 20 mm erreicht werden.

2.3 Abgeschottetes Sohlsegment

Bei üblichen Hydroschilden wird das durch das Schneidrad abgebaute Material über ein Saugrohr, das sich im Sohlbereich der Druckkammer befindet, abgezogen. Davor befinden sich – je nach Projektanforderung – ein Rechen und ein Steinbrecher.

Bei Böden, die zu Verklebung neigen, hat sich allerdings in der Vergangenheit gezeigt, dass sich in diesem Bereich Anhaftungen aufbauen, welche zeitintensive Reinigungs- und Spülarbeiten zur Folge haben.

Bei der NZL kam wegen des Verklebungspotentials der Kleiformationen ein abgeschottetes Sohlsegment in Verbindung mit einem Walzenbrecher zum Einsatz. Dabei wird die Druckkommunikation zwischen Abbaukammer und Druckkammer nicht über die Tauchwandöffnung, sondern über zwei Ausgleichsrohre geschaffen. Der Materialabtransport erfolgt über zwei Einzugswalzen direkt aus dem Sohlbereich des Abbauraums. Das Bentonitniveau in der Druckkammer ist unabhängig von der Materialabförderung. Das Druckluftpolster in der Druckkammer, das auf den freien Spiegel der Stützflüssigkeit wirkt, regelt den erforderlichen Stützdruck an der Ortsbrust.

Das abgebaute Material wird mit hoher Geschwindigkeit hinter dem Schneirad der Abbaukammer entzogen; ein Ablagern und Verkleben wird verhindert.

Ein zusätzliches Spülkonzept und das optimierte Schneiraddesign ermöglichten Vortriebsgeschwindigkeiten von bis zu 40 mm/min im Eemklei.

2.4 Angepasste Schildspurverpressung

Die Qualität der Ringraumverpressung ist maßgebend für die Vermeidung von Setzungen. Hierfür werden die Rezeptur und die Konsistenz des Mörtels auf den anstehenden Boden abgestimmt und Verpressmenge und -druck während des Vortriebs kontinuierlich überwacht.

Zur Überwachung wurde entlang des Schildschwanzes und am Ende zum Ringspalt hin der Schildschwanz mit radial und axial eingebauten Druckaufnehmern ausgerüstet. Diese lagen in der Nähe der Ausgänge der Verpressleitungen.

Die gemessenen Daten wurden als Vergleichs- bzw. Referenzwerte für die gemessenen Drücke in den Verpressleitungen verwendet und in der Steuerkabine visualisiert und vom Datenerfassungssystem aufgezeichnet. Die Messdaten der insgesamt 18 Druckaufnehmer ermöglichten damit eine kontinuierliche Überwachung des eingestellten Mörteldrucks.

Zusätzlich wurden die Mörteldrücke im Ringspalt und der anliegende Stützdruck auch am Tableau der Mörtelverpressung visualisiert, welches nicht am Steuerstand, sondern bei den Verpresspumpen platziert war. Der auf der TBM fest installierte Mörtelkübel war zudem mit Wiegezellen ausgestattet, so dass dem Verpresspumpenfahrer zu jeder Zeit die verpresste Tonnage bekannt war.

Die Setzungen direkt oberhalb der Tunneltrasse im Straßenbereich betragen im Mittel nicht mehr als 4 mm. Setzungen an der Bebauung konnten nur an zwei Gebäuden festgestellt werden, wobei diese Setzungen sehr gering und nicht sicher den Vortriebsarbeiten zuzuordnen waren.

3 Schild Transfer System (STS)

Bei Start- und Zielvorgängen der TBM-Vortriebe sind mehrere Dichtungsebenen zwingend erforderlich, damit ein Eindringen von Grundwasser und mitgeschwemmtem Bodenmaterial in die Station/Schacht hinein verhindert und Setzungen im Baugrund vermieden werden. In der Regel werden zwei redundante, temporäre Dichtsysteme vorgesehen. Häufig werden vor der Station liegende Dichtblöcke und in der Station für den Startvorgang Brillendichtungen sowie für den Zielvorgang kurze Dichttöpfe verwendet, näher beschrieben in [1].

Bei der NZL war die Herstellung von Dichtblöcken vor den Stationen aufgrund der großen Tiefenlage (bis -30m NAP) verfahrenstechnisch nicht möglich. Zudem galt es, Störungen im Bereich der Stationsköpfe für Leitungsinfrastruktur, Verkehr, Umgebung und Anwohner zu minimieren.

In den Stationen wurden aus Gründen der Optimierung der Aushubs- und Ausbaumassen sowie zur Minimierung der teilweise dafür benötigten Druckluftarbeiten die Bodenplatte im mittleren Bereich der jeweiligen Stationen höher und damit abgetrepppt ausgeführt.

Beim Transfer durch die Stationen mussten die TBMs Stufen von bis zu 1,65 m überwinden. Alternative Hebeeinrichtungen, wie z.B. Portalkräne, kamen aus Platzgründen innerhalb der Station und Gewichtsgründen der TBM (Schild ca. 450 t) nicht in Frage.

Daher wurde vorgesehen, die sechs Start- und vier Zielvorgänge aus bzw. in einen die TBM komplett einhüllenden großen, druckwasserdichten Drucktopf erfolgen zu lassen. Diese Konstruktion wird Schild Transfer System, kurz STS, genannt. Der mit stirnseitig aktivierbaren Dichtungen versehene Drucktopf übernimmt dabei die Funktion des Dichtblocks. Das redundante Dichtsystem der Brillendichtung und des kurzen Dichttopfs herkömmlicher Lösungen (Lippendichtung, Bullflexschlauch) wird innerhalb der Brillenwandaussparung und im Drucktopf platziert, so dass auch beim System des STS zwei unabhängige Dichtsysteme vorhanden sind.

Für den Startvorgang der TBM besitzt dieses System den Vorteil, dass im Falle des Versagens der Lippendichtung der Stahltopf Umläufigkeiten in die Station/Schacht verhindert. Dieser Umstand bietet zudem ein hohes Maß an Sicherheit, sobald das Schildgelenk der TBM die Lippendichtung passiert.

Die Start- und Zielvorgänge sowie den Transfer einer TBM durch die Station über Stufen mittels eines einhüllenden Stahltopfs durchzuführen, stellen eine Innovation im maschinellen Tunnelbau dar. Erfahrungen mit einer solchen Konstruktion lagen zu Projektbeginn nicht vor.

3.1 STS-Konstruktion

Das STS bestand im Wesentlichen aus drei Konstruktionsteilen, siehe Bild 4. Für die Lastabtragung der ca. 450 t schweren TBM bei den Start-, Zielvorgängen und dem Transfer durch die Stationen wurde eine klassische Schildwiege gewählt. Der auf bis zu 4 bar ausgelegte Drucktopf (rot) wurde nicht durch das Gewicht der TBM belastet. Er lag lose auf den zwei Längsträgern der Schildwiege (grau) auf. Die zwei Längsträger waren mit den Querträgern verschweißt. Die außen an den Querträgern befestigte Vershub- und Hebeeinheit (grün) diente ausschließlich dem horizontalen Verfahren sowie dem vertikalen Anheben und wurde bei Start- und Zielvorgängen nicht belastet. Der Vorteil der konstruktiven Trennung des Drucktopfes von der Lastabtragung lag darin, dass keine Zwängungen im Drucktopf infolge unplanmäßiger Lageabweichungen der TBM erfolgen und die Dichtung hierdurch nicht belastet wurde.

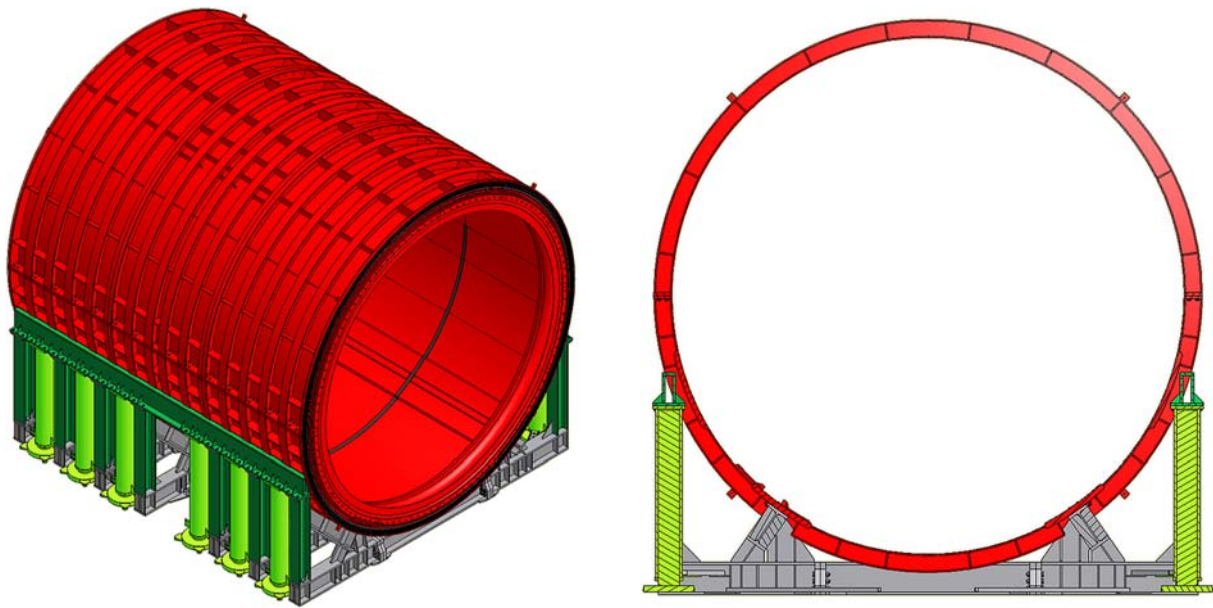


Bild 4: STS–Bauteile, Drucktopf (rot), Schildwiege (grau), Verschub- und Hebeeinheit (grün)

Die räumliche Enge in den Stationen der NZL und vor allem die kleinen Logistiköffnungen in den Stationsdecken hatten zur Folge, dass die Abmessungen der Bauteile des STS minimiert werden mussten. Aus diesem Grund wurden die Schildwiege und der Drucktopf in einzelne Elemente unterteilt. Die Schildwiege, die Verschub- und Hebeeinheit und der Drucktopf erreichten ein Gesamtgewicht von ca. 150 t.

3.2 Start- und Zielvorgang

Für die Start- und Zielvorgänge wurde das STS bis an die Stationswand geschoben, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Der Drucktopf wurde mit Pressen gegen einen stählernen Abstützbock (A-Bock) kraftschlüssig gedrückt. Ein Verschieben des Drucktopfes und damit verbundene Undichtigkeiten waren somit ausgeschlossen. Die Lasten aus dem TBM-Vortrieb wurden über den A-Bock in den Stationsboden abgeleitet.

Für den Zielvorgang wurde ein Druckdeckel auf das Topfende gesetzt. Mittels aktivierbarer Pressen, die sich zwischen dem Druckdeckel und dem A-Bock befanden, wurden der Drucktopf und der Druckdeckel kraftschlüssig und lagesicher gehalten.

Für den Transfervorgang der TBM durch die Station wurden der Druckdeckel und die Abstützkonstruktion samt Widerlager komplett demontiert.



Bild 5: Start- und Zielkonstruktion

Der Topfennendurchmesser war mit 7,10 m lediglich 22 cm größer als der Durchmesser der TBM.

3.3 Stationstransfer der TBM

Nach dem Einfahren der TBM in den Drucktopf mussten die Nachläufer von der TBM für den Stationstransfer abgekoppelt werden. Nur der Bohrkopf wurde mit dem STS durch die Station und über die Stufen transportiert. Die deutlich einfacher zu handhabenden Nachläufer konnten über steil angelegte Nachläuferwiegen auf die höher liegenden Stationsböden gezogen und am gegenüberliegenden Stationsende wieder an den TBM-Schild angekoppelt werden.

Die Vershub- und Hebeeinheit des STS bestand aus sechs eigens gefertigten Langpressenpaaren mit einer maximalen Hubhöhe von 1,85 m und einer aufnehmbaren Last von 1250 kN je Presse. Auf unter den Pressen angeordneten Lastmodulen mit Stickstoffkissen glitten die STS durch die Station (1% Reibungsverlust). Mit Seilwinden wurde das STS bis an die Treppenstufe gezogen, wo die Langpressen ausgefahren und das STS mit TBM (Gesamtgewicht etwa 600 t) auf die Höhe der Stufe angehoben wurde, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

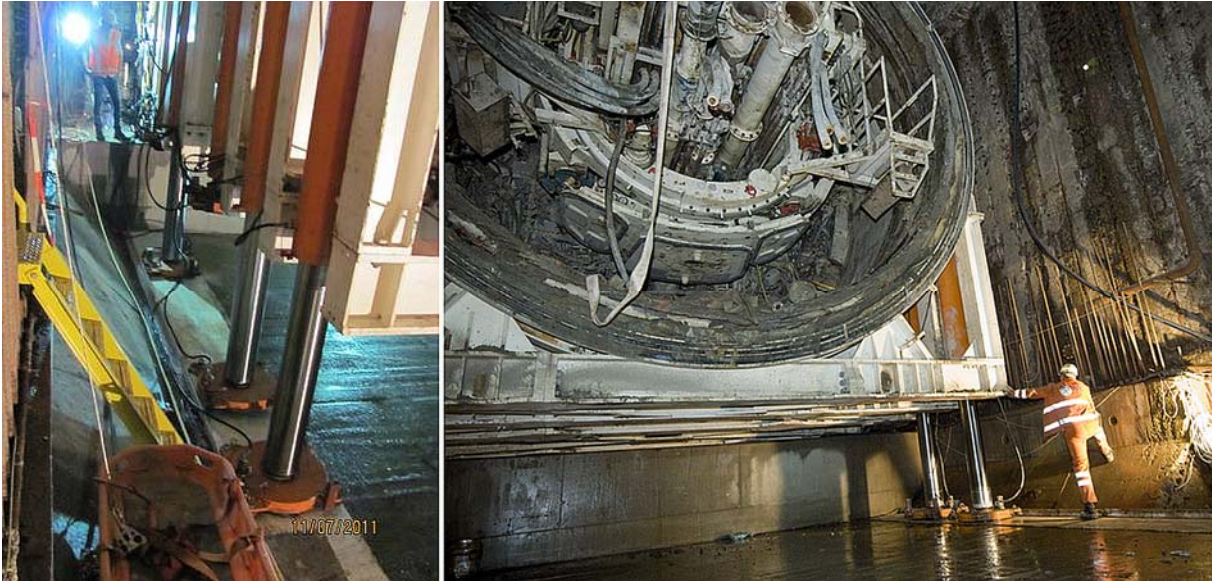


Bild 6: Hub über 1,65 m Stationsstufe, Langpressen und Lastmodule (orange); TBM-Schild im Drucktopf

Der Hub über die Stufe erfolgte im Schreitvorgang, so dass abwechselnd immer nur eins der sechs Pressenpaare entlastet wurde.

Der weitere Transfer durch die Station und das Absenken des STS in den tiefer liegenden Startbereich erfolgten in umgekehrter Reihenfolge.

3.4 Baubetriebliche Aspekte

Aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse der Baustelleneinrichtung übertage sowie auch teilweise in den Stationen selbst war das STS in mehrere Bauteile gegliedert. Eine Lagerhaltung der einzelnen Bauteile auf der BE war in Amsterdam nicht möglich. Durch eine entsprechend intensive Logistikplanung und umfangreiche Abstimmung erfolgte der Aufbau des STS durch eine Just-in-time-Anlieferung innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeitfenster. Der STS-Aufbau bis hin zur Empfangsbereitschaft für die TBM dauerte im Wochenbetrieb (5 Tage / 12 h) ca. 8 Wochen.

Für eine problemlose Ein- und Ausfahrt der TBM ($d = 6,88 \text{ m}$) in den Drucktopf des STS ($d = 7,1 \text{ m}$) war eine Schildfahrt mit Abweichungen von maximal 50 mm von der Sollachse tolerierbar und wurde auch sicher erreicht.

Für den Transfer der TBMs durch die Stationen wurden 35 Tage im Durchlaufbetrieb (7 Tage / 24 h) benötigt, einschließlich An- bzw. Abkoppeln der Nachläufer, Rückbau und erneuter Aufbau der Abstützkonstruktionen.



Bild 7: Transfer und Demontage Druckdeckel STS

Das Überwinden der Stufen mit dem STS gelang innerhalb von ca. 4 h pro Stufe. Eine Lösung wie das STS ist im Engineering, der Herstellung und Handhabung deutlich aufwendiger und damit teurer als herkömmliche Lösungen für Start- und Zielvorgänge. Trotzdem stellt der Einsatz des STS unter den gegebenen Randbedingungen und der geführten Risikobewertung eine technisch sinnvolle Lösung dar. Die Verschmelzung von herkömmlicher Brillendichtung, kurzem Dichttopf und außenliegender Dichtblöcke in einen langen stählernen Drucktopf für Start- und Zielvorgänge der TBM hat sich bewährt und stellt eine mögliche Alternative zu den üblichen Dichtsystemen dar. Die Kombination des Drucktopfs mit der Verschieb- und Hebeeinheit zur Überwindung der abgestuften Stationsböden ist technisch realisierbar und ermöglicht einen sicheren Transfer.

4 Kompensationsinjektionen

4.1 Standort Brug 404

Aufgrund von Voruntersuchungen durch den Bauherrn wurden insgesamt 8 Gebäude entlang der Trasse der NZL als stark setzungsempfindlich eingestuft. Diese Gebäude waren mittels Kompensationsinjektionen (KI), von sieben Schächten aus zu sichern. Dazu wurden alle Gebäude vor Beginn der Vortriebsarbeiten durch Bodenverfestigungen stabilisiert und

vorgehoben. Während und nach der Passage durch die TBM wurden die Setzungen gemessen und bei einer Überschreitung der vorab definierten Eingreifwerte nachinjiziert.

Beispielhaft wird nachfolgend der Standort Brug 404 näher beschrieben, bei dem die Tunnelröhren eine Brücke über den Amstelkanal unterqueren, deren Widerlager auf Pfählen gegründet sind. Die Brückenwiderlager (UK bei 1,75 mNAP) sind durch Holzpfähle (UK 12,50 mNAP) in der ‚Ersten Sandlage‘ (dichtgelagerter Fein- bis Mittelsand) tief gegründet. Die beiden Tunnelröhren passierten den Bereich der Brug 404 höhenversetzt (Tunnelfirste Ost -14,3 mNAP; Tunnelfirste West -25,4 mNAP). Das Bodenpaket zwischen UK Pfahlgründung und Tunnelfirste betrug somit für den Westtunnel 12,9 m und für den Osttunnel lediglich 1,8 m.

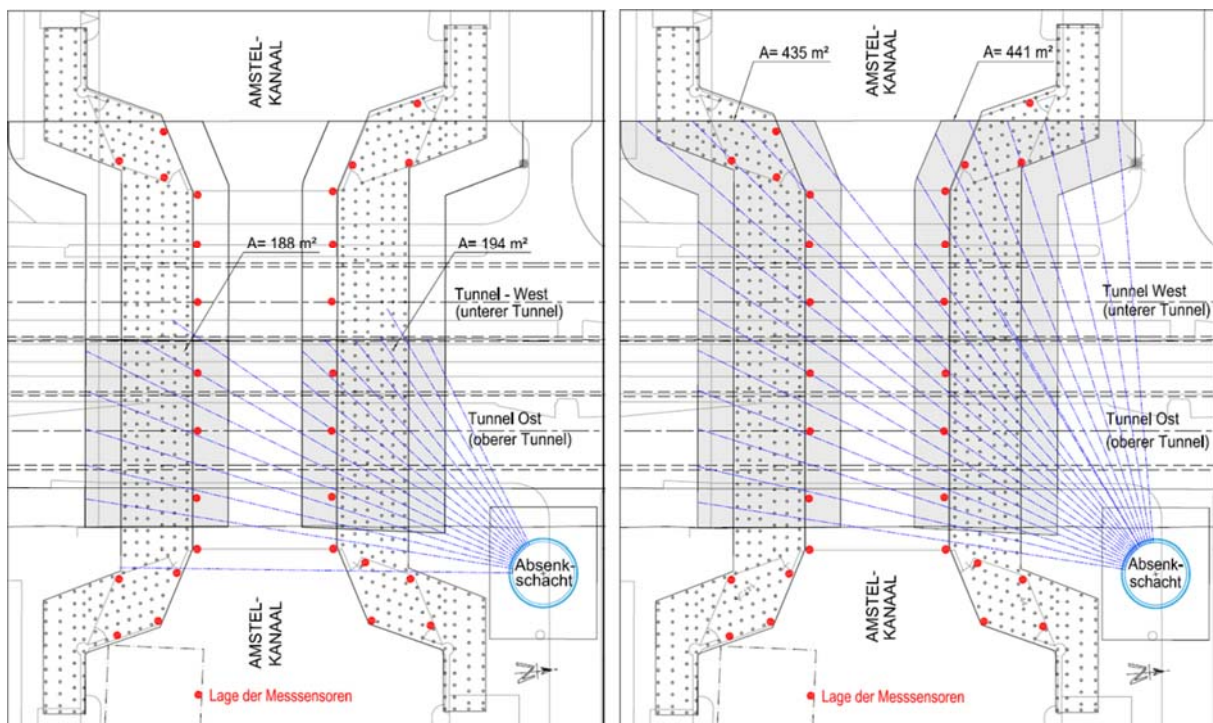


Bild 8: TAM Layout KI-Standort Brug 404 (links: oberer Schirm, rechts: unterer Schirm)

Für die KI wurde zunächst ein Absenschacht nord-östlich des nördlichen Brückenwiderlagers hergestellt. Aus diesem Schacht heraus wurden anschließend die TAM-Bohrungen (Tube à Manchette) radial hergestellt (siehe Bild 8).

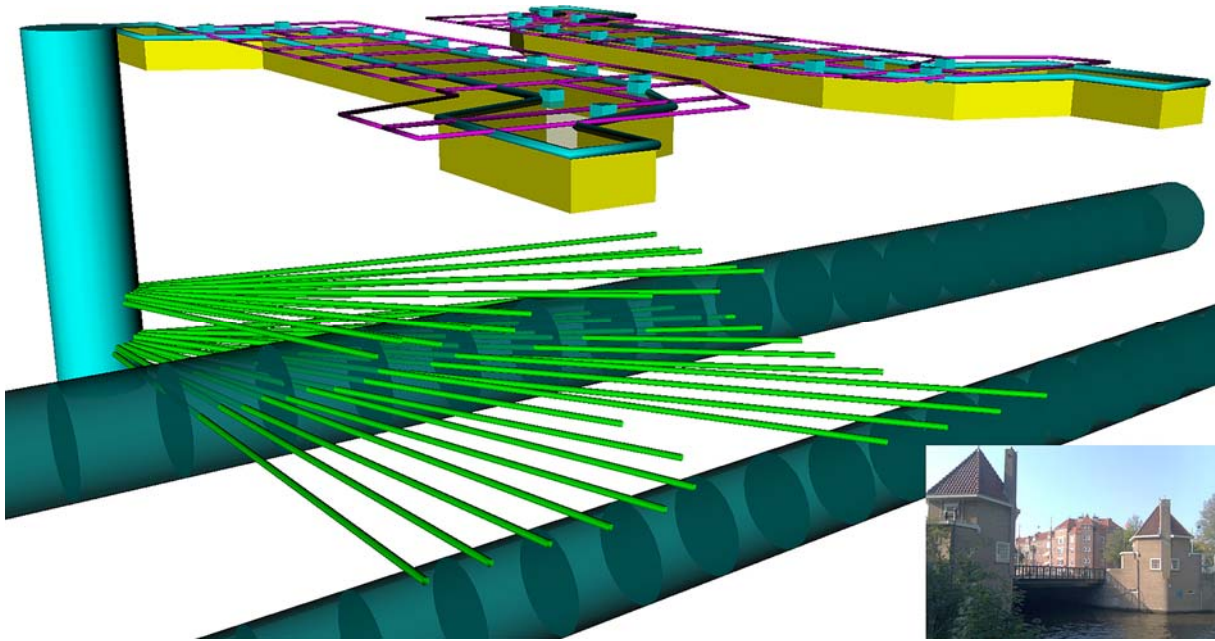


Bild 9: Modell KI Standort Brüg 404 (SOFIA): 3d-Visualisierung der geometrischen Randbedingungen

Aufgrund der Bohrtoleranzen von ca. 1,0% konnte der KI-Schirm nicht komplett im oberen 1,8 m mächtigen Bodenpaket erstellt werden und wurde daher als ein aufgelöster KI-Schirm ausgeführt. Der obere Schirm kam im Bereich zwischen der Tiefgründung und dem (oberen) Osttunnel bei ca. -13,0 mNAP zum Liegen. Der untere Schirm wurde direkt im Bereich des Osttunnelquerschnitts bei ca. -16,0 mNAP hergestellt. Die TAMs des unteren Schirms lagen somit direkt im Bereich der oberen Tunnelröhre und wurden während des Vortriebs Ost planmäßig zerstört. Daher wurden die TAMs aus PVC-Rohren hergestellt. Hauptaufgabe des unteren Schirms waren die Kompensation der Setzungen infolge des Vortriebs West (untere Röhre) und eine Vergütung des Bodens im Bereich des Tunnels Ost.

Die ‚Gesamt‘-Hebefläche der KI Maßnahme war in Tunnelquerrichtung durch die rechnerische 5mm-Setzungslinie infolge TBM-Vortrieb begrenzt und in Tunnellängsrichtung durch einen Überstand von ca. 3,0 m ab Außenkante der Brücken-Widerlager (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Die Überwachung der Brückenwiderlager erfolgte mit jeweils vierzehn Schlauchwaagen, deren Messwerte alle 3 Minuten erfasst und an die Steuer- und Auswertesoftware übertragen wurden.

Die Auswertung und Steuerung der Injektionen wurde mit Hilfe der Software SOFIA vorgenommen, die alle relevanten Daten (Bauwerksgeometrien, Lage der TAMs und der Messsensoren sowie sämtliche Injektionsparameter) verwaltet (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Zusätzlich liefert das Programm Injektionsempfehlungen zur Erreichung der geplanten Hebung.

4.2 Injektionsmaßnahme Brug 104

Während der Herstellung des Absenkschachts und der Bohrungen für die TAMs kam es zu keinen nennenswerten Setzungen.

Mit der ersten Injektionsphase, der sogenannten Vorhebung, wurde der Boden verdichtet und die Brug 404 um ca. 5 mm angehoben, siehe Bild 10. In dieser ersten Phase betrug die Verpresseffizienzen ca. 15%. Wegen Verzögerungen in anderen Teilen des Gesamtprojekts konnte der TBM-Vortrieb erst über zwei Jahre später nach diesen Vorhebungen durchgeführt werden, so dass sich die Brug 404 in dieser Zeit im Mittel um ca. 2mm, teilweise bis zu 4-5 mm wieder setzte. Aus diesem Grund wurde die Phase der Vorhebung kurz vor TBM-Durchfahrt wiederholt. Über den beaufschlagten Kompensationsflächen reagierten die Hebungssensoren der Brug 404 unmittelbar. Es waren daher nur geringe Mengen Verpressmaterial erforderlich, um den definierten Vorhebungswert wieder zu erreichen. Es wurden nun Verpresseffizienzen von über 30% erreicht.

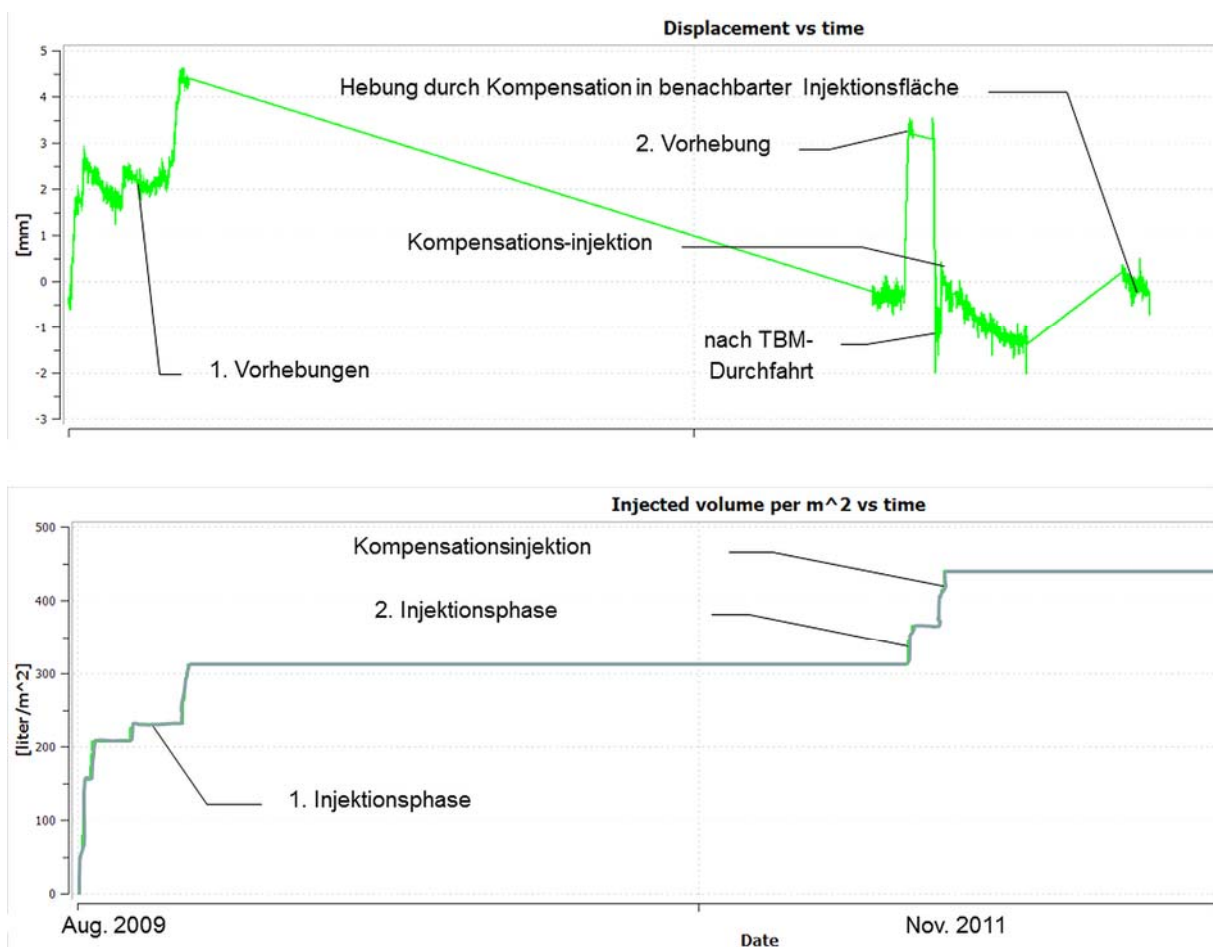


Bild 10: Bauwerksbewegungen Brug 404 und erforderliche Verpressmengen

Mit Durchfahrt der „unteren“ TBM (West) traten vor allem über der Tunnelachse Setzungen auf, die allerdings gering ausfielen. Nur geringe Mengen Verpressgut waren notwendig, um direkt nach der TBM-Durchfahrt den Setzungsprozess zu stabilisieren und durch Hebung zu kompensieren. Bei Durchfahrt der oberen TBM waren dann keine Kompensationsmaßnahmen mehr erforderlich.

Wie bei der Brug 404 wurde auch an den anderen Standorten infolge der Bauzeitverlängerung der Boden zweimal „vorinjiziert“. An allen Standorten zeigte sich, dass während des TBM-Vortriebs nur unkritische Setzungen gemessen wurden und nur geringste Mengen für die eigentlichen Kompensationsinjektionen erforderlich waren. Die Vorvergütungen des Bodens im Rahmen der Kompensationsmaßnahme waren damit hilfreich, um einen setzungsarmen Tunnelvortrieb zu ermöglichen.

5 Schlussfolgerungen

Die oben beschriebenen Erfahrungen hinsichtlich der Vortriebsmaschinen, der Verfahrenstechnik sowie der geohydrologischen Randbedingungen zeigen, dass innerstädtische Schildvortriebe allerhöchste Anforderungen an die eingesetzte Technik stellen.

In Amsterdam wurde bereits im Rahmen der Vergabe seitens des Bauherrn und unter Mitwirkung der bauausführenden Firmen eine gesamtheitliche Analyse des Bauvorhabens durchgeführt, geprägt durch eine Risikobewertung für die gewählten Bauverfahren der Stationen und Tunnelröhren.

Spezielle Projektanforderungen machten maßgeschneiderte Lösungen, wie z.B. das TBM-Design, das Schild Transfer System und die Hebungsinjektionen, erforderlich. Damit konnten im Zuge der Vortriebe bestehende Bebauung schadensfrei unterfahren werden.

Für zukünftige Projekte mit ähnlichen Anforderungen wie in Amsterdam ist es daher ratsam, eine ganzheitliche Einschätzung von Risiken, Herstellungskosten und Zeitfaktoren für den Bau der Stationen sowie den Bau der Tunnelstrecken vorzunehmen, um über den Einsatz von entsprechenden Systemen zu entscheiden.

6 Literatur

- [1] Nord/Süd-Metrolinie Amsterdam – Schild Transfer System (STS); Friedemann, Fennker, Schwitte, Otten; Bautechnik 90 (2013) Heft 3; Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co

Artikel auch veröffentlicht in Stuva-Tagungsband (2013); Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V., Stuva Köln: "Metro Amsterdam: Vortrieb eines innerstädtischen Tunnels in schwieriger Geologie und unter sensibler Bebauung – Maschinen- und Auffahrkonzept, Hebungsinjektionen und Querschläge"; Friedemann, Otten, Hillebrenner, Mayer

Artikel auch veröffentlicht in Heft 57(2014) Beiträge zum 13. Geotechnik-Tag München – Geotechnik und Aspekte des Tunnelbaus; Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München: " Metro Amsterdam: Vortrieb eines innerstädti-

schen Tunnels in schwieriger Geologie und unter sensibler Bebauung"; Friedemann, Otten, Hillebrenner, Mayer