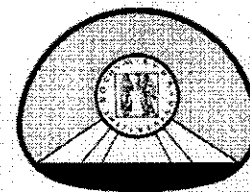




Leerstoel voor bouwprocestechnologie, tunnelbouw en bouwbedrijf
Ruhr-Universiteit Bochum, 44780 Bochum, Duitsland

Gemeente Amsterdam
Projectbureau Noord/Zuidlijn
ir. P.P.M.K. Janssen
Rokin 92
Postbus 95089
1090 HB Amsterdam

Leerstoel voor
bouwprocestechnologie,
tunnelbouw en
bouwbedrijf



em. o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. B. Maidl
Ministerstr. 11

D-44797 Bochum

(0234) 970 770

Fax (0234) 970 77 88

E-mail: imm.bochum@t-online.de

Bochum, 22 juni 2009

Noord/Zuidlijn Amsterdam

Verkennd advies inzake de beoordeling van de blow-outveiligheid voor de Noord/Zuidlijn

1. Aanleiding, opdracht en werkwijze

Naar aanleiding van de opdracht aan de Commissie Veerman werd prof. dr. B. Maidl belast met het opstellen van een uiteenzetting en beoordeling inzake de blow-outveiligheid voor de Noord/Zuidlijn volgens de huidige stand het ontwerp.

Als voorbereiding daarop vonden op 15 en 22 april 2009 twee besprekingen plaats in Nederland. De opdracht werd verstrekt na toezending per e-mail op 11 mei 2009 van de in hoofdstuk 2 genoemde documenten.

Met het Projectbureau Noord/Zuidlijn werd afgesproken dat in eerste instantie door prof. dr. B. Maidl een verkennend advies zou worden opgesteld. Dit advies is gebaseerd op een grove controle door het IMM van de beschikbare documenten met betrekking tot de huidige stand van zaken (zie punt 2). Deze controle wordt door het IMM voortgezet.

2. Documenten en literatuur

Ter beschikking gestelde documenten

1. Steundrukberekening Saturn

- Tunnel 1, spoor 1 en 2: doc.nr. UP.BER.BPT.105
- Tunnel 2, spoor 1 en 2: doc.nr. UP.BER.BPT.106

- Tunnel 3, spoor 1 en 2: doc.nr. UP.BER.BPT.107
 - Tunnel 4, spoor 1 en 2: doc.nr. UP.BER.BPT.108
2. Plannen met aanduiding van de geologie en de gradiënten
 - Geotechnisch lengteprofiel; westelijke tunnelbuis; stand 18 maart 2009
 - Geotechnisch lengteprofiel; oostelijke tunnelbuis; stand 18 maart 2009
 3. Rapportage Boorfrontstabiliteit van GeoDelft met diverse brieven

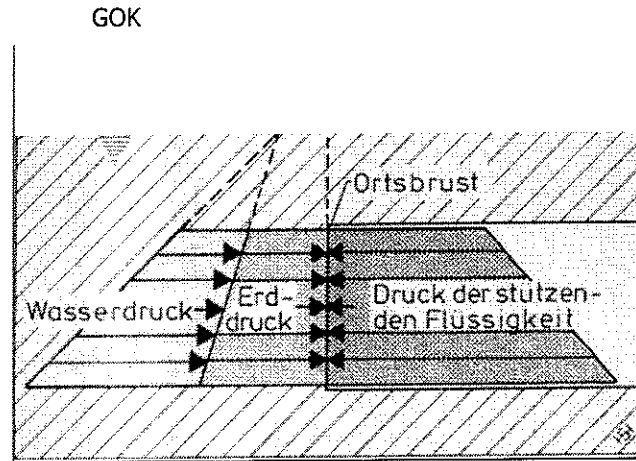
Een uiteenzetting inzake de blow-outveiligheid van het ontwerpteam was niet beschikbaar.

Gebruikte literatuur

4. B. Maidl, M. Herrenknecht, U. Maidl, G. Wehrmeyer
Maschineller Tunnelbau — Schildvortrieb [Machinale tunnelbouw — Schildmethode]
Ernst + Sohn Verlag Berlin, tweede druk - in voorbereiding
5. ZTV-ING deel 5 Tunnelbouw (stand 12/2007)

3. Toelichting op de bouwwijze (samenvatting literatuur punt 2.4)

Bij de Noord/Zuidlijn wordt gebruik gemaakt van een tunnelboormachine (schildtype) met vloeistofondersteuning van het boorfront (zie figuur 1).



Figuur 1: Principe van vloeistofondersteuning [2.4]

[tekst in afbeelding]

GOK = Maaiveld

GW = Grondwater

Ortsbrust = Boorfront

Wasserdruck = Waterdruk

Erddruck = Gronddruk

Druck der stützenden Flüssigkeit = Druk van de steunvloeistof

[einde tekst in afbeelding]

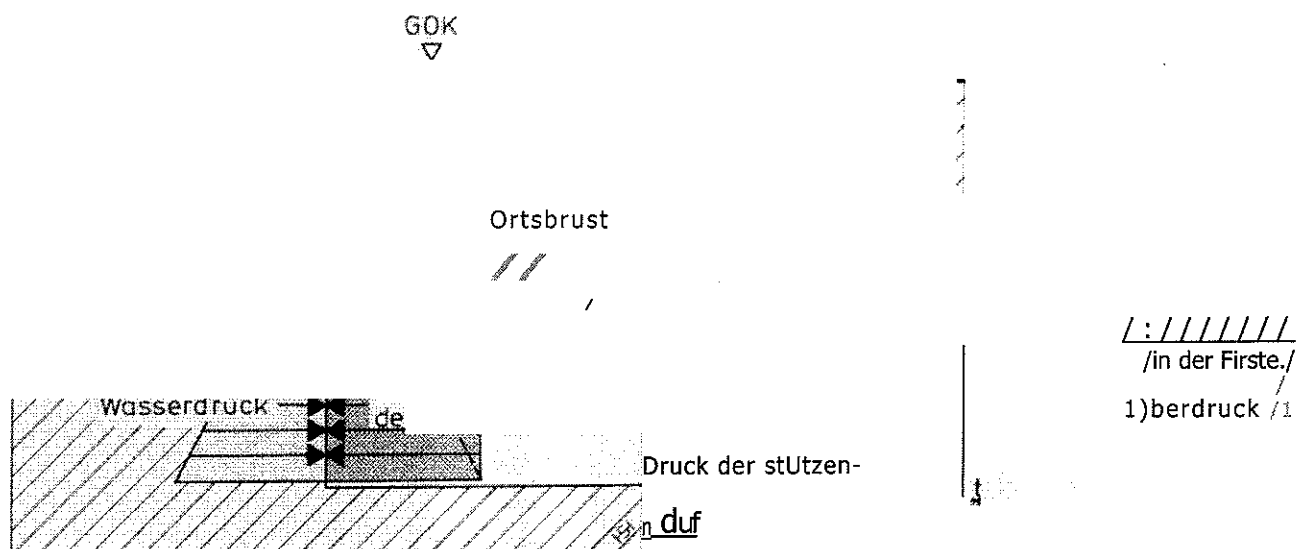
Bij de vloeistofondersteuning kan een veilige ondersteuning van het boorfront worden gerealiseerd met een onder druk staande vloeistof. Zowel op de aanwezige gronddruk als op de waterdruk wordt tegendruk uitgeoefend. Bij de Noord/Zuidlijn wordt gebruik gemaakt van waterbentonietsuspensie. Het bentoniet wordt in de steunvloeistof toegepast vanwege de bodemmechanische eigenschappen, de plasticiteit en het zwelvermogen. De suspensie dringt onder steundruk in de bodem door en sluit door de meegevoerde vaste bestanddelen (stopkorrel) het boorfront af met een zo dun mogelijke maar ondoordringbare film (filterkoek), via welke de steundruk uitgeoefend kan worden. Dit proces vindt plaats in een kort tijdsbestek van ongeveer 1 à 2 seconden.

Voor de stabiliteit van het boorfront, de opbarstveiligheid en de blow-outveiligheid zijn de daarvoor vereiste bouwstadia met luchtdrukondersteuning veel interessanter dan de normale werkwijze met vloeistofondersteuning. Deze stabiliteitskwesties worden in hoofdstuk 4 afzonderlijk behandeld.

Toelichting op het gebruik van luchtdruk

Luchtdruk is nodig om in de graafkamer van gereedschap te wisselen, controles uit te voeren en obstakels te verwijderen, etc. De tunnelboormachine (schild) bij de Noord/Zuidlijn is daarop

ingericht. Een volledige verlaging is daarbij niet strikt noodzakelijk. Aangezien de principes overeenkomen met een type boormachine (schild) met luchtdrukondersteuning, citeer ik uit Maidl, et. Maschineller Tunnelbau — Schildvortrieb (punt 2.4):



Figuur 2: Principe van luchtdrukondersteuning [2.4]

[tekst in afbeelding]

GOK = Maaiveld

GW = Grondwater

Ortsbrust = Boorfront

Wasserdruck = Waterdruk

Überdruck in der Firste = Overdruk in het dak

Druck der stützenden Luft = Druk van de steunlucht

[einde tekst in afbeelding]

Met name bij een poreuze bodem mag in de regel geen gebruik worden gemaakt van luchtdrukondersteuning om de gronddruk op te nemen. De gronddruk moet aanvullend worden opgenomen volgens het principe van natuurlijke ondersteuning of door mechanische ondersteuning. De methode wordt sinds het begin van de negentiende eeuw toegepast. Het principe is afgebeeld in figuur 2. De waterdruk stijgt lineair met de afstand tot het (grond)wateroppervlak. Daar is het water in geval van ongespannen water drukloos. Bij artesisch grondwater (gespannen water) stijgt de waterdruk uitgaande van een waarde groter dan nul. Om te voorkomen dat er water de tunnel binnenstroomt, moet de luchtdruk worden ingesteld op een waarde die groter is dan of gelijk is aan de hoogste waterdruk bij het boorfront. Dat is op het laagste punt van de tunnel, dat wil zeggen op de bodem. Wanneer nu de luchtdruk in de tunnel exact op de waterdruk bij de bodem wordt ingesteld, kan er geen water meer in de holle ruimte terechtkomen. Dit is ook het geval bij een gedeeltelijke verlaging.

De luchtdruk in de tunnel is op elke plaats van het boorfront even groot. Dit betekent dat de luchtdruk boven in de tunnel hoger is dan de waterdruk, wat daar tot een ontsnapping van lucht leidt. Bij een geringe dekking bestaat het risico dat de bodemdeeltjes door de stroming hun stabiliteit verliezen en het uiteindelijk tot een instabiliteit komt in de vorm van een 'blow-out'. Deze processen worden in hoofdstuk 5

uitvoerig besproken. Varianten met een gedeeltelijke verlaging van het grondwater of het gedeeltelijke verlaging van de steunvloeistof in de tunnelboormachine zijn met succes toegepast wanneer voldoende vakkennis en ervaring aanwezig waren.

Wisselende doorlatendheidswaarden voor water boven $k_w = 10^{-4}$ m/s bemoeilijken toepassing van de methode, omdat de lucht het water gemakkelijker uit de groter wordende poriën verdrijft en vervolgens zelf in steeds grotere hoeveelheden ontsnapt. Verder is boven het tunneldak een minimumdekking nodig om de blow-outveiligheid aan te tonen. Een beperking tot een maximale druk van 3,6 bar ('overdruk') is volgens de huidige voorschriften van de beroepsvereniging verplicht wanneer de drukkamer wordt betreden.

4. Uiteenzetting inzake de stabiliteit van het boorfront voor luchtdrukondersteuning volgens ZTV-ING (literatuur punt 2.5)

Luchtdrukondersteuning (pag. 12, punt 6.3.2.3)

- (1) Ondersteuning van het boorfront met luchtdruk mag alleen in uitzonderingsgevallen worden toegepast, wanneer de bodemgesteldheid vanuit technisch oogpunt geen ander steunprincipe toelaat.
- (2) Bij het betreden van de graafkamer met luchtdruk (bijvoorbeeld voor inspecties) moet bij het boorfront een membraanwerking worden bewerkstelligd en gehandhaafd. Bij grotere luchtverliezen moeten speciale maatregelen worden getroffen, bijvoorbeeld verbetering of vernieuwing van de membraanwerking door het opspuiten van suspensie of het creëren van de bedrijfstoestand suspensieondersteuning zonder/met uitvoering van bodemverbetering.
- (3) De luchtdruk en het luchtverbruik moeten voortdurend worden gemeten en bewaakt. Wanneer er significante veranderingen in de waarden optreden, moeten er overeenkomstig punt (2) speciale maatregelen worden getroffen of moet de actie worden beëindigd.
- (4) In geval van ondersteuning door luchtdruk moet overeenkomstig nr. 6.3.2.1 punt (4) worden aangetoond dat het boorfront stabiel is. Daarbij moet de waterdruk op het laagste punt van het met luchtdruk ondersteunde boorfront met $\gamma = 1,05$ -voudige veiligheid door de luchtdruk op de betreffende diepte worden gehandhaafd.
- (5) De veiligheid tegen opbarsten van de bodem moet worden aangetoond overeenkomstig nr. 6.3.2.1.
- (6) Bij gebruik van luchtdruk moet aan de opdrachtgever altijd per geval bewijs worden overgelegd.

5. Toelichting op de veiligheidsbewijzen, met name de blow-outveiligheid

Voorafgaand aan het ontwerp moet al worden nagedacht over de vraag hoe het onvoorziën ontsnappen van lucht uit de werkkamer (blow-out) kunnen worden voorkomen. Gelet op de risico's en de schade die een blow-out kan veroorzaken, moet tijdig aandacht worden besteed aan voorkoming en bestrijding. Preventieve maatregelen zijn onder meer:

- dichtmaken van eventuele boorgaten
- ontwerpmatig voorzien in voldoende dekking, boven de tunnel
- diverse aanvullende maatregelen, zoals injecties, bevrozing, ballastering, etc.

Uit vereenvoudigde stabiliteitsberekeningen blijkt dat bij een effectief volumegewicht van de vaste gronddekking van meer dan $1,0 \text{ [t/m}^3\text{]}$ een totale dekking $\beta_1 \geq 1,0 \cdot \alpha$ voldoende veiligheid biedt tegen blow-out (figuur 3).

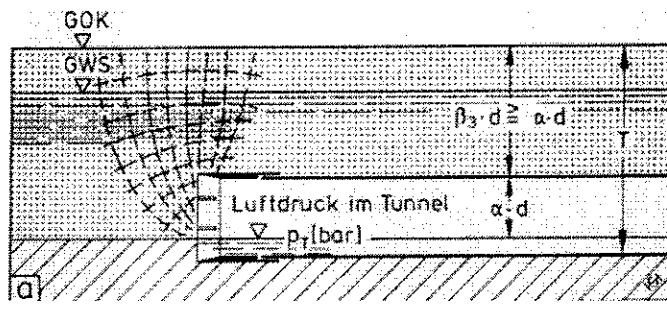
Bij luchtdrukondersteunde boringen onder open water werd in de praktijk en ook in modelproeven vastgesteld dat op een onbeschermde waterbodem bij de plaats waar lucht ontsnapt deels sterke veranderingen en bodemverstoringen optraden als gevolg van de vorming van een diepe trechter. Om ook dan veiligheid tegen blow-out te hebben en om een vaste dekking $\beta_1 \geq 1,0 \cdot \alpha$ te krijgen, wordt aanbevolen een totale dekking van $\beta_2 \geq 2 \cdot \alpha$ te kiezen (figuur 3).

De trechtersvorming is afhankelijk van de bodemeigenschappen, maar ook van de boorsnelheid. Trechtersvorming kan vrijwel volledig worden voorkomen wanneer een goed getrappt belastfilter wordt aangebracht. Daarom is het raadzaam om bij een relatief kleine gronddekking uit voorzorg gebruik te maken van een belastfilter, dat door peilingen gedurende de bouw wordt gecontroleerd en waar nodig onderhouden.

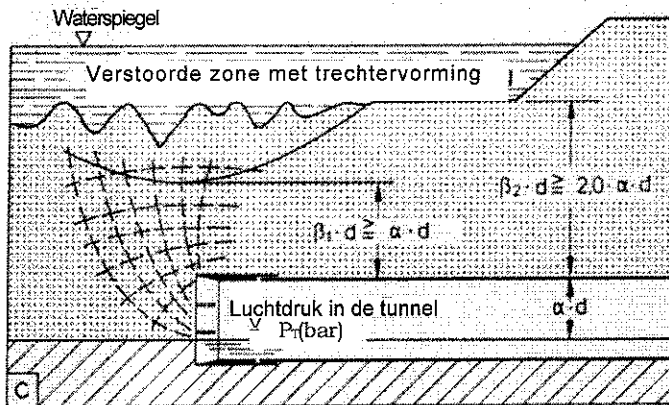
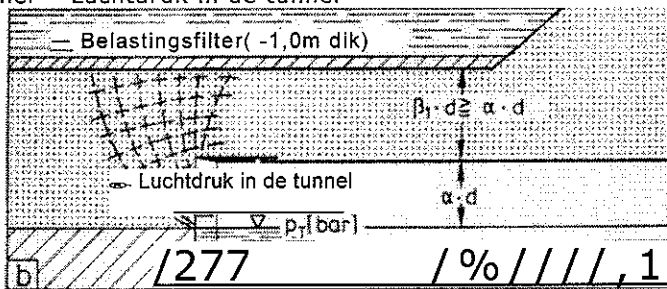
Voor een gelaagde bodem kunnen geen eenvoudige relaties worden aangegeven. De noodzakelijke maatregelen moeten daar per geval worden onderzocht en beoordeeld.

Bij gebruik van een luchtdrugschild (tunnelboormachine met luchtdrukondersteuning) aan land — maaiveld boven de grondwaterspiegel — werd tot dusver geen trechtersvorming aan de oppervlakte vastgesteld. De dekking zal hier meestal zo groot zijn dat er geen blow-outgevaar bestaat, temeer omdat bij de stabiliteitsberekening uitgegaan wordt van een hoog volumegewicht van de bodem boven de grondwaterspiegel. Wat het gebruik van luchtdruk betreft zal daarom ook zonder belastingsfilter bij een doorlatendheidshomogene bodem een

minimumdekking $\beta_3 \geq 1,0 \cdot \alpha$ volstaan.



GOK = Maaiveld
 GWS = Grondwaterspiegel
 Lucht-druk in de Tunnel = Lucht-druk in de tunnel



Figuur 3: Minimumdekking bij gebruik van een luchtdrukschild
 a) aan land, met vrije grondwaterspiegel onder het maaiveld
 b) onder open water met beschermde bodem van het water (belastingsfilter)
 c) onder open water met onbeschermde bodem van het water

6. Resultaten van de grove controle van de beschikbare documenten (stand eind mei 2009)

6.1 Normale werkzaamheden

De steundrukberendingen van Saturn leveren voor de normale werkzaamheden de volgende resultaten op met betrekking tot de opbarstveiligheid.

De normale werkzaamheden zijn over het geheel genomen op ongeveer 87% van het tracé van spoor nr. 1 (tunnel 1 tot en met 4) zonder aanvullende maatregelen uitvoerbaar. De normale werkzaamheden van spoor nr. 2 kunnen volgens de steundrukberending op ca. 58% van het tracé zonder aanvullende maatregelen plaatsvinden.

Uit de controle van de steundrukberending door het IMM kwamen vragen naar voren met betrekking tot de gehanteerde volumegewichten van de bodem, de verkeers- en gebouwbelasting en de regeltolerantie. Het IMM moet nog vergelijkende berekeningen uitvoeren, waar nodig met driedimensionale modellen op kritieke punten. De controle van de steundrukberending wordt door het IMM voortgezet.

Tijdens het vervolg van de controle en het overleg met de betrokkenen wordt bepaald welke aanvullende maatregelen noodzakelijk zijn.

Uitgaande van de huidige situatie kan bevestigd worden dat de Noord/Zuidlijn in beginsel haalbaar is.

De onderzoeken van GeoDelft wijzen uit dat bij de randvoorwaarden met betrekking tot de normale werkzaamheden niet ten volle rekening wordt gehouden met de huidige kennisstand.

6.2 Blow-outveiligheid

Uit de onderzoeken van Saturn blijkt dat bij ongeveer 17% van spoor nr. 1 en bij ca. 50% van spoor nr. 2 (tunnel 1 tot en met 4) verlagingen zonder aanvullende maatregelen kritiek worden.

Om het risico te beperken, maar ook om economische redenen, wordt aanbevolen om voor het betreden van de graafkamer alleen luchtdruk toe te passen voor het onvoorzien verwijderen van obstakels. Wanneer de blow-outveiligheid niet aangetoond kan worden, moeten daartoe aanvullende maatregelen worden getroffen, zoals injecties, bevroering, ballastering, etc.

Een planbare gereedschapswisseling, of ander onderhoud aan de machine, moet worden gepland op plaatsen waar geen blow-outrisico bestaat. Dat kan in de stations zijn of in

geplande 'onderhoudsstations', dat wil zeggen injectieblokken op mogelijke plaatsen in het tracé.

Saturn moet in het geologisch lengteprofiel de plaatsen aanduiden waar luchtdrukinterventie mogelijk is, en de betreffende aanvullende maatregelen aangeven.

7. Samenvatting

Wat de steundrukberekening betreft moet een tweetal zaken worden aangetoond:

1. de opbarstveiligheid; deze geldt voor de normale werkzaamheden
2. de blow-outveiligheid; deze geldt in het specifieke geval waarin de graafkamer moet worden betreden

In dit advies wordt alleen de blow-out safety (blow-outveiligheid) behandeld.

Het speciale geval waarin de graafkamer moet worden betreden, kan tot op zekere hoogte worden gepland. Zo moeten de gereedschapswisseling en de onderhoudswerkzaamheden in de graafkamer worden uitgevoerd op plaatsen die geen risico's opleveren voor de omgeving (omwonenden) en het personeel in de bouwput. Waar nodig moeten ook zogenoemde 'graafkamerbetreedstations' door middel van injecties e.d. worden aangelegd.

Toch moet het voor het verwijderen van obstakels op alle plaatsen van het tracé mogelijk zijn de graafkamer te betreden om de boorwerkzaamheden uit te voeren. Daarvoor is stillegging nodig. Bij het betreden van de graafkamer moet luchtdruk worden toegepast onder gedeeltelijke of volledige verlaging van de steunvloeistof. Dergelijke bouwsituaties moeten als risicoanalyses worden ontworpen. Waar nodig moeten aanvullende maatregelen worden getroffen om de blow-outveiligheid aan te tonen.

Uit het onderzoek van het tracé met gradiënten voor de Noord/Zuidlijn is gebleken dat volgens de huidige stand van de beschikbare documenten het project in beginsel haalbaar is en blow-outveiligheid op enkele plaatsen met behulp van aanvullende maatregelen kan worden gerealiseerd.

De volgende aanbevelingen worden nog gedaan:

- Tijdens de uitvoering moet erop worden toegezien dat er altijd voldoende vakkundig personeel beschikbaar is, met name voor het bedienen van de machine.
- De werkzaamheden moeten waar mogelijk continu zonder belangrijke onderbrekingen worden uitgevoerd, aangezien stilstandtijden en het opnieuw opstarten grote risico's voor de opbarst- en blow-outveiligheid inhouden.
- Onontbeerlijk is een vereist gegevensbeheer als informatie- en controlesysteem. Het daarvoor op te zetten systeem moet direct, dus in 'real-time' informatie verschaffen, zodat in de bouwput nog actief kan worden gereageerd om

gevaarlijke situaties te voorkomen. Alle interacties tussen de bodem, de bouwuitvoering en het zettingsgedrag moeten daarbij worden vastgelegd. Op plaatsen met blow-outgevaar moeten aanvullende controle- en bewakingsmaatregelen worden getroffen. Het gegevensbeheer moet onafhankelijk van elkaar door Saturn en de Noord/Zuidlijn worden uitgevoerd. In geval van afwijkingen of gevaarlijke situaties dient er onmiddellijk een afstemming plaats te vinden. Op het gegevensbeheer moet zowel in de planning als in de uitvoering toezicht worden gehouden door een onafhankelijke toetser.

Bochum, 22 juni 2009

Prof. Dr. B. Maidl



o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. B. Maidl
Ministerstraße 11
44797 Bochum
Duitsland
Telefoon 00-49-0234/4728-40