

Rapport

Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Bouwdienst Rijkswaterstaat

Projectnaam

VALANK

Projecttitel

Onderzoek vallend scheepsanker op tunneldak

PBMS-code

3617C

Rapporttitel

Samenvattende eindrapportage

Documentnummer

VAL99-18

Auteur

D.W. Hemelop

Status

definitief, versie 1

Datum

10 februari 2000

Postbus 20000, 3502 LA UTRECHT
Griffioenlaan 2, 3526 LA UTRECHT

Telefoon (030) 285 76 00
Telefax (030) 285 79 54

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING	1
2. CONCLUSIES	2
3. LITERATUURSTUDIE.....	2
4. RISICOANALYSE.....	3
5. NUMERIEKE ANALYSES BOTSING ANKER OP TUNNELDAK	4
5.1. TWEE-DIMENSIONALE BEREKENINGEN	4
5.2. DRIE-DIMENSIONALE BEREKENINGEN	4
5.3. VARIANTENSTUDIE BOTSING ANKER OP TUNNELDAK.....	5
6. BEREKENING PENETRATIE ANKER IN GROND.....	6
6.1. ANALYSE MET REKENMODEL VOLGENS DE "STRAIN-PATH" METHODE.....	6
6.2. ANALYSE MET E.E.M.-PROGRAMMA DIEKA	7
6.2.1. <i>Eerste sessie berekeningen</i>	8
6.2.2. <i>Tweede sessie berekeningen</i>	8
6.3. EXPERIMENTEEL ONDERZOEK PENETRATIE ANKER	9
7. PARAMETERSTUDIE T.B.V. ONTWERPGRAFIEKEN.....	12
7.1. GEBRUIK ONTWERPGRAFIEKEN	12
7.2. BEPALING BEGINSNELHEID VALLEND ANKER	13
8. OVERZICHT RAPPORTEN	15

1. INLEIDING

Het vraagstuk van een anker dat op een tunneldak valt, kent een lange geschiedenis. Eind jaren tachtig is door Ir. J. Schillings bij afdeling Bouwspuurwerk een begin gemaakt om het probleem aan te pakken. Deze studie is toen niet geheel afgerond maar heeft in ieder geval geresulteerd in een rekenmodel¹, gebaseerd op een massa-veer systeem en enkele programmamodulen, geschreven in FORTRAN. Deze programmamodulen zijn door afdeling DIO vertaald in Pascal en aangevuld met een userinterface voor gebruik op een PC. Met dit programma kan de belasting op een tunneldak worden berekend als gevolg van een anker dat op een onbeschermd betonnen tunneldak valt. Met dit programma is een parameterstudie uitgevoerd waaruit bleek dat in bepaalde gevallen de belasting op het tunneldak te hoog zou kunnen worden.

Eind 1994 is in opdracht van afdeling Tunnelbouw door afdeling DIO een onderzoek gestart om de gevolgen van vallende ankers op tunneldaken beter te onderkennen en de onzekerheid met betrekking tot de in rekening te brengen belasting weg te nemen. Ook diende meer inzicht te worden verkregen over de effectiviteit van een afdekking van zand of grind op het tunneldak. Tevens zou het PC-programma getoetst moeten worden met behulp van meer geavanceerde rekenmodellen.

Een projectteam, bestaande uit de heren N. Otaredian (projectleider), A. de Boer, H.J. v.d. Graaf, D.W. Hemelop, G.L. Tan en G.M. Wolsink werd opgericht. Lopende het project is bij het vertrek van Otaredian het projectleiderschap overgenomen door D.W. Hemelop en is B.P. Rigter in het projectteam opgenomen.

Na een eerste verkenning bleek dat een gezamenlijke projectaanpak met de externe opdrachtnemers TNO Bouw en Grondmechanica Delft wenselijk was: TNO voor de constructieve aspecten van het tunneldak en GD voor de grondmechanische problematiek met betrekking tot de afdekking. Door afdeling Waterbouw van de Bouwdienst is een risico-analyse opgesteld.

Teneinde het afbreukrisico te beperken is het onderzoek in fasen opgedragen en in deelstudies uitgevoerd. Het gehele project heeft in hoofdlijnen uit de volgende onderdelen bestaan, in min of meer chronologische volgorde:

1. Literatuurstudie
2. Risicoanalyse
3. Voorstudie penetratie anker in grond
4. 2D E.E.M.-analyse van botsing anker op onbeschermd tunneldak
5. 3D E.E.M.-analyse van botsing anker op onbeschermd tunneldak
6. E.E.M.-analyse penetratie anker in grond in twee stappen
7. Experimenteel onderzoek (valproeven)
8. Variantenstudie botsing anker op beschermd tunneldak
9. Parameterstudie penetratie anker in grond, leidend tot ontwerpgrafieken

Na het uitvoeren van de literatuurstudie zijn drie onderzoeksporen uitgezet:, bestaande uit een risicoanalyse (onderdeel 2), penetratie anker in grond (onderdelen 3, 6 en 7) en de numerieke analyse en variantenstudie van de botsing van een anker op onbeschermd tunneldak (onderdelen 4, 5 en 8). Deze drie sporen zijn min of meer parallel uitgevoerd, zonder de interactie tussen de sporen uit het oog te verliezen. De verschillende onderzoeksporen worden respectievelijk in de hoofdstukken 4, 5 en 6 behandeld. Tenslotte is een parameterstudie gedaan naar de penetratie van ankers met een massa van 1, 2, 5 en 10 ton bij valsnelheden van $5 \sqrt{m}$ 10 m/s met als doel het opstellen van ontwerpgrafieken.

Dit rapport bestaat in hoofdzaak uit de samenvattingen, conclusies en aanbevelingen van de deelstudie-rapporten, welke door Grondmechanica Delft en TNO gedurende de uitvoering van de onderzoeksfases zijn opgesteld.

2. CONCLUSIES

Uit dit onderzoek is gebleken dat het rekenen aan problemen waarbij sprake is van een combinatie van een driedimensionaal model, dynamische belastingen, grote vervormingen en niet-lineaire materiaaleigenschappen veel vergt van de inventiviteit om met de beschikbare programmatuur binnen het gestelde budget tot een goed antwoord te komen. Waar mogelijk of noodzakelijk door de complexe werkelijkheid, zijn dan ook vereenvoudigingen in de modellering van het probleem aangebracht.

Belastingen op het tunneldak, die met behulp van de ontwerpgrafieken kunnen worden bepaald, zijn hierdoor eerder orde-grootte belastingen dan exact rekenkundig bepaald. Wel is vast komen te staan dat in principe moet worden voorkomen dat het tunneldak rechtstreeks kan worden geraakt door een vallend anker. Zonder de afdekking van het tunneldak met een laag zand en/of grind kan het dak al snel bezwijken onder de stootbelasting van een vallend anker. Pons en het afsplatten van een laag beton aan de onderkant van het dak door de schokgolf in het dak zijn hierbij de maatgevende mechanismen. Uiteraard speelt de massa en valsnelheid van het anker hierin ook een belangrijke rol. De modelstudie met de Wijkertunnel heeft bijvoorbeeld uitgewezen dat een anker van 10 ton (van een groot zeeschip ca. 60 kTon) bij een valsnelheid van 5 m/s door een zand(grind)laag van 1 meter doordringt en het dak raakt. Het dak zal hierdoor bezwijken door pons.

3. LITERATUURSTUDIE

Deze studie² werd uitgevoerd door TNO Bouw, Centrum voor Mechanische Constructies. Er is met name gezocht naar rekenmethodieken en materiaalmodellen voor dynamische belastingen op grond en beton, gegevens over ankers en risicoanalyses m.b.t. vallende voorwerpen, w.o. ankers.

In de literatuur werden veel gegevens over materiaalmodellen en rekenmethodieken voor het modelleren van een impactbelasting van een vallend voorwerp (anker) op beton. Over het penetreren van een vallend anker in grond werd minder informatie gevonden.

Volgens verschillende literatuurbronnen zou de valsnelheid van een anker in water ca. 7-9 m/s bedragen. Voor het gewicht van het anker blijkt er geen direct verband te zijn tussen ankergewicht en scheepstonnage maar wel tussen ankergewicht en type en afmetingen van het schip.

T.a.v. van de kans dat een anker op een tunneldak valt, werd weinig of geen direct toepasbare gegevens gevonden. Wel is er een hoeveelheid statistische gegevens gevonden over ankerverlies van schepen en andere voorwerpen die van schepen en booreilanden vallen. Voor de maximaal te accepteren faalkans werd een waarde van 10^{-6} per jaar gevonden. Met falen van een tunnel wordt in dit geval bedoeld dat de tunnel door een vallend anker lek raakt en in korte tijd volloopt met water waardoor slachtoffers kunnen vallen en de tunnel onherstelbaar beschadigd is door gevolgschade in de vorm van grote zettingen.

Op basis van deze literatuurstudie is aan Grondmechanica Delft en TNO Bouw elk een plan voor verder onderzoek gevraagd. Deze plannen hebben geleid tot een gezamenlijk plan van aanpak waarbij TNO Bouw de berekeningen aan het tunneldak op zich zou nemen (zie hoofdstuk 5) en Grondmechanica Delft het penetreren van het anker in grond verder zou bestuderen (zie hoofdstuk 6). Afdeling Waterbouw van de Bouwdienst is gevraagd om een risicoanalyse (zie hoofdstuk 4) te maken.

4. RISICOANALYSE

Door afdeling Risicoanalyse van hoofdafdeling Waterbouw (BD) wordt in hun rapport³ een globale methodiek gepresenteerd om de kans op het verlies van een anker met een bepaalde massa boven een tunnel te berekenen. Deze methodiek is uitgewerkt in een voorbeeld aan de hand van de Wijkertunnel.

Aangezien deze kans sterk afhangt van het aantal scheepsbewegingen boven de tunnel in kwestie kan geen algemeen geldende waarde worden genoemd en zal deze kans voor elke tunnel of waterweg opnieuw moeten worden bepaald. In het rapport wordt niet ingegaan op grenswaarden omdat op dat moment nog niet bekend was welke schade een vallend anker kan veroorzaken.

5. NUMERIEKE ANALYSES BOTSING ANKER OP TUNNELDAK

TNO Bouw, afdeling Numerieke Mechanica, heeft in drie fasen berekeningen uitgevoerd met het eindige elementen programma DIANA. Eerst enkele voorstudies^{4,5} met behulp van twee- en driedimensionale modellen. Later is een variantenstudie⁶ uitgevoerd met verschillende belastingvarianten, waarbij weer is teruggegrepen naar het 2D-model.

Bij alle berekeningen is telkens de Wijkertunnel als uitgangspunt genomen voor het constructief model. Dit model bestaat uit een deel van het dak vanaf de route in de onderkant van het dak van de linker tunnelbuis tot aan de buitenwand van de rechter tunnelbuis. In lengterichting van de tunnel is ca. 21,5 meter aan weerszijden van het punt, waar het anker het dak raakt, in rekening gebracht. Omdat in lengterichting het model symmetrisch is hoeft in lengterichting maar één helft van het dakdeel te worden gemodelleerd met symmetrische randvoorwaarden langs de zijde die samenvalt met het raakpunt van het anker.

Om de invloed van het overige deel van de tunnel op het gedrag van het gemodelleerde deel goed in rekening te brengen zijn met behulp van raamwerkberekeningen van de gehele tunneldoorsnede de randvoorwaarden bepaald voor het deelmodel.

In alle berekeningen is een statische belasting t.g.v. eigen gewicht en een waterdruk van 200 kN/m³ aangehouden. Het dynamische effect van de watermassa die in beweging komt na het vallen van het anker is buiten beschouwing gelaten.

Aangenomen is dat het anker op het dak valt in het midden van de overspanning. Dit is voor de momenten in het dak de meest ongunstige plaats. Voor dwarskracht en pons zal een locatie, dicht bij één van de opleggingen ongunstiger zijn. De dynamische belasting van het anker is ingevoerd door het gewicht van het anker in de vorm van een verhoogde soortelijke massa van een aantal elementen t.p.v. het contactoppervlak aan te brengen terwijl de bijbehorende knopen een beginsnelheid wordt gegeven overeenkomend met de valsnelheid van het anker. Hierdoor was het niet mogelijk om lokale verbrijzeling van beton als gevolg van het penetreren van het anker in het dak te berekenen. Dit werd echter beschouwd als een ondergeschikt schademechanisme en bovendien toch sterk afhankelijk van de vorm van het anker en de positie op het moment van raken.

5.1. Twee-dimensionale berekeningen

Eerst is begonnen met een 2-D berekening met als doel een indruk te krijgen van de optredende schade en de schademechanismen. Voor de dynamische belasting is een anker met een massa van 10.000 kg en een valsnelheid van 7 m/s aangehouden. Inherent aan de modellering is bezwijken van het tunneldak met buiging als voornaamste mechanisme geconstateerd. Niettemin deden de lokale vervormingen een bezwijken op grond van een ponsmechanisme vermoeden. Aanbevolen werd om het 2-D model te valideren en het lokaal bezwijken nader te analyseren met een 3-D model.

5.2. Drie-dimensionale berekeningen

Het 3-D model is gebaseerd op het 2-D model en bestaat voor het grootste deel uit 2-D schaalementen. Rondom het raakpunt van het anker werden 3-D volume-elementen toegepast. Dit geeft de mogelijkheid het bezwijken door pons nader te bestuderen. Ook bij deze berekening is uitgegaan van 20 meter water boven het tunneldak en een anker met een massa van 10.000 kg bij een valsnelheid van 7 m/s.

De dynamische berekening voor beide modellen verschillen duidelijk van karakter: voor het 3-D model zijn de golfvoortplantingsverschijnselen over de hoogte van het tunneldak bepalend voor het gedrag. Bezwijken treedt reeds op kort nadat de spanningsgolf wordt gereflecteerd aan de onderzijde van het tunneldak. Dit wordt aangetoond door hoge lokale verplaatsingen, hoge schuifrekken in beton en vloeien van wapening aan de onderzijde van het tunneldak. In het 2-D model is dit golfverschijnsel over de dikte afwezig. Bij de 2-D berekening is doorgerekend tot 2,5 ms. Evenals bij het 3-D model is dan vloeien van de wapening aan de onderzijde van het tunneldak opgetreden. Voor beide modellen zijn de vervormingen sterk gelokaliseerd rond en onder het anker. Voor het 3-D model betekent dit tevens dat een voldoende groot invloedsgebied rond het anker is gemodelleerd met volume elementen. In tegenstelling tot het 2-D model, waarin alleen bezwijken op buiging voorspeld kon worden, treedt bij het 3-D model lokaal schade op ten gevolge van 'spalling', m.a.w. het wegslaan van beton aan de onderzijde. Geconcludeerd wordt dat de gegeven belasting zal leiden tot een gat in het tunneldak. De schade zal gelokaliseerd blijven onder het anker. Het bezwijken van het tunneldak was ook reeds geconcludeerd aan de hand van de resultaten van de 2-D berekening. Met deze 3-D berekening is evenwel meer inzicht in het schade mechanisme verkregen. Nadeel van het 3-D model is de omvang en de tijd die het rekenproces en postprocessing vergen. Voor een variantenstudie wordt daarom aanbevolen om 2-D modellen te gebruiken.

5.3. Variantenstudie botsing anker op tunneldak

In deze studie zijn een 4-tal berekeningen gemaakt, met ankermassa's 2000 kg en 10.000 kg elk met een beginsnelheid van het anker van 5 m/s en 10 m/s. Voor de berekeningen is het 2D-model uit eerdere berekeningen gebruikt met een essentiële wijziging m.b.t. de modellering van het anker. Er wordt nu verondersteld dat er een dekkingslaag boven het tunneldak aanwezig is. Op grond van de berekeningsresultaten van Grondmechanica Delft (zie hoofdstuk 6, par. 2.2) wordt nu ook het penetreren van het anker in de grond gemodelleerd. Vervolgens kan het anker het dak eventueel ook nog raken. Dit gaat gepaard met een concentratie van het drukgebied op het tunneldak tot een straal van 0,05 m.

Uit de berekening met een anker van 2.000 kg en beginsnelheid 5 m/s kon al uit de berekening van Grondmechanica Delft worden opgemaakt dat deze het tunneldak niet zal raken. Hier wordt geen schade aan het tunneldak voorspeld.

De andere drie berekeningen (2.000 kg bij 10 m/s; 10.000 kg bij 5 m/s en 10.000 kg bij 10 m/s) resulteren in botsingen met het tunneldak met restsnelheden van circa 3 m/s tot 9 m/s, voordat de berekening aangeeft dat geen evenwicht meer gevonden kan worden. Al deze berekeningen tonen dan een kleine afname van de snelheid van het anker.

De resultaten laten verticale verplaatsingen, verhoogde spanningen in de wapening en de extra scheurvorming in het beton zien die zeer geconcentreerd zijn, vlak bij de plaats waar het anker het dak raakt. Eerst ontstaat aan de onderzijde van het tunneldak op deze plaats extra scheurvorming. Vervolgens, als de wapening op het punt staat om te gaan vloeien, is (momenten-)evenwicht in de doorsnede rondom de straal van 0,05 meter onmogelijk. Het vallende anker met zijn nog hoge restsnelheid is hierbij op te vatten als een effectieve belasting. Dit is de fysische verklaring waarom ook in de analyse geen evenwicht gevonden kan worden.

Op grond van de resultaten wordt bij de drie laatstgenoemde berekeningen wel schade aan het tunneldak voorspeld. De resultaten van het 2D model geven een zeer geconcentreerd bezwijkmechanisme. Dit zou analoog aan de eerdere studie weer geverifieerd kunnen worden door middel van een 3D studie. De toegevoegde waarde van een dergelijke berekening achten TNO echter beperkt.

6. BEREKENING PENETRATIE ANKER IN GROND

Door Grondmechanica Delft is onderzoek gedaan naar het indringingsmechanisme van een vallend anker in de afdeklaag op een tunneldak. Dit fenomeen kent een aantal aspecten die het rekentechnisch tot een complex probleem maken. Behalve de dynamica heeft men ook te maken met grote vervormingen en het niet-lineair mechanisch gedrag van het korrelskelet alsmede een twee-fase karakter door de interactie grondwater-korrelskelet. Een rekenpakket dat alle genoemde aspecten in zich verenigd is niet voorhanden. Door vereenvoudiging van het probleem werd het mogelijk om een numeriek rekenmodel te ontwikkelen waarmee een globaal toetsende analyse kon worden gedaan. De vereenvoudigingen bestonden uit een versimpeling van het twee-fase karakter door uit te gaan van volledig gedraineerd gedrag en de massatraagheidsaspecten van het grondgedrag buiten beschouwing te laten.

Naast het numerieke rekenmodel zijn berekeningen uitgevoerd met het in eerste instantie voor hei-analyses ontworpen computerprogramma TNOWAVE. Het uitvoeren van berekeningen met TNOWAVE voor het fenomeen van een in een grondlaag indringend anker vereist een sterke schematisering en een vertaling van materiaalparameters van grond naar de grootte van veren en dempers in het programma. De doelstellingen van het uitvoeren van berekeningen met TNOWAVE kunnen echter als volgt worden omschreven:

- het uitvoeren van vergelijkende berekeningen als een onafhankelijk onderzoekspoor
- het in staat zijn tot het uitvoeren van relatief eenvoudige gevoeligheidsanalyses na ijking van de invoerparameters met betrekking tot het onderhavige probleem.

Na het uitvoeren van voornoemde berekeningen⁷ is in een tussentijdse evaluatie⁸ een plan opgesteld voor verder onderzoek.

6.1. Analyse met rekenmodel volgens de "strain-path" methode

Het rekenmodel is gebaseerd op de "strain-path" methode volgens Baligh. De volgende doelstellingen lagen aan het ontwikkelen van en rekenen met dit model ten grondslag:

- het maken van een eerste (globaal toetsende) analyse van een penetrerend anker in een grondlichaam boven een tunneldak
- het kunnen doen van een uitspraak over de rechtvaardiging van de vereenvoudiging van het consolidatie-effect en het verwaarlozen van de dynamische effecten
- het afschatten van het geldigheidsgebied van een eventueel te hanteren eindige elementen model en/of experimenten (een onderbouwde keuze voor het vervolgtraject).

Met dit model zijn een aantal berekeningen uitgevoerd met de volgende uitgangspunten:

- anker gewichten 10, 6 en 2 ton bij een gelijkblijvend oppervlak met een straal van 1 meter. Aanvullend is nog een berekening met een anker van 2 ton en een straal van 0,7 meter gemaakt;
- valsnelheid in alle gevallen 9 m/s;
- waterhoogte boven zandlaag 15 meter;
- grondparameters, gebaseerd op een redelijk vastgepakt zand.

Uit een eerste analyse met het rekenmodel van het penetratie-proces van een vallend anker in een grondlaag boven een tunneldak kan het volgende worden geconcludeerd:

- de totale tijdsduur van het indringen van het anker ligt voor de referentie-waarden rond de 0,12 seconden;
- indien een anker het tunneldak zeer dichtbij genaderd is loopt de berekening vast,

- nog vóórdat het anker tot stilstand is gekomen;
- cavitatie treedt op in een beperkte zone rond het anker;
- het invloedsgebied van schuifvervormingen waardoor een grotere ongedraineerde schuifweerstand ontstaat is niet groter dan circa 3 maal de straal van het gat dat door het anker wordt achtergelaten;
- in zand wordt het anker volgens het model voornamelijk afgeremd door een toename van de schuifweerstand van het zand door dilatantiewerking.

Met betrekking tot de vereenvoudiging van het twee-fasen gedrag kan worden geconcludeerd dat voor een afdeklaag met zand het gehele indringproces ongedraineerd kan worden genoemd.

Met betrekking tot de invloed van dynamische effecten op het indringproces kan het volgende worden geconcludeerd:

- de invloed van de kinetische energie van de gronddeeltjes is in het model op een vereenvoudigde wijze meegenomen, doch zorgt voor problemen in het rekenproces op het moment dat het anker bijna het tunneldak raakt. De berekende waarde voor de opslag van kinetische energie in het zand is dan niet meer betrouwbaar;
- de energie-opslag in kinetische energie van de gronddeeltjes is niet verwaarloosbaar en neemt toe naarmate de massa van het anker groter is;
- de invloed van de dynamica van de gronddeeltjes op het vervormingsbeeld kan in het model niet worden meegenomen.

Een integraal model waarin zowel dynamica, grote vervormingen, 2 fase gedrag en een optimaal grondmodel gecombineerd zijn is niet beschikbaar. Volgens TNO en GD komen de E.E.M.-programma's DIANA en DIEKA het meest in aanmerking. Het constitutieve model in DIEKA benadert het werkelijk gedrag van de grond (vooralnog) beter dan het model in DIANA en in DIEKA is gelaagdheid in te brengen (bovenkant afdeklaag en overgang grond/tunneldak). Nadeel is dat in DIEKA de invloed van dynamische effecten op het vervormingsbeeld niet wordt meegenomen. Voorgesteld wordt de berekeningen met DIEKA uit te voeren en het dynamische aspect te toetsen door enkele vergelijkende berekeningen met DIANA te maken. Deelaspecten, zoals bijvoorbeeld het geometrische effect van het naderen van het tunneldak en de invloed van de massatraagheidseffecten op het vervormingspatroon van de grond zouden met een experimentele verificatie getoetst dienen te worden.

6.2. Analyse met E.E.M.-programma DIEKA

De keuze voor het E.E.M.-programma DIEKA voor het uitvoeren van verdere berekeningen was gebaseerd op de volgende kenmerken van het programma:

- geschikt voor grote vervormingen;
- modelleren van ongedraineerd gedrag mogelijk;
- het programma kan met gelaagdheid rekenen;
- met enige aanpassingen is in het programma een geschikt materiaalgedrag beschikbaar;
- het programma biedt vrijheid voor wat betreft de geometrische modellering.

De invloed van dynamische effecten kan niet direct met DIEKA worden meegenomen. De tijd, die bij dynamische problemen een parameter is, wordt pas verkregen bij het uitwerken van een energiebalans. Het massatraagheids effect van het in beweging komen van de grond zit wel in de energiebalans, maar eventuele invloeden van de massatraagheidseffecten op het vervormingspatroon van de grond worden verwaarloosd.

6.2.1. Eerste sessie berekeningen

Het doel van de berekeningen⁹ in deze fase van het VALANK-project was de verificatie van de bruikbaarheid van DIEKA als voorspellingsmodel voor het indringen van een anker in de grond. Dit werd gedaan aan de hand van een vergelijking van de DIEKA berekeningsresultaten met resultaten van valproeven bij de Liefkenshoektunnel in Antwerpen. Over deze proeven is vooraf informatie verzameld en met betrokken personen uit België is overleg geweest.

Op grond van de diverse berekeningen die met DIEKA zijn uitgevoerd en de vergelijking van de resultaten met de gegevens die van de proeven bij de Liefkenshoektunnel beschikbaar zijn, worden de volgende conclusies getrokken:

- Het programma DIEKA biedt goede mogelijkheden voor analyses van penetrerende ankers door grond.
- De penetratiedieptes van de proeven bij de Liefkenshoektunnel, gebaseerd op de ijking gegevens, liggen binnen de bandbreedte van de DIEKA resultaten.
- Belangrijke parameters van de grond zijn de dilatantiehoek en de elasticiteitsmodulus omdat deze de grootte van de optredende water(onder)spanningen bepalen. De wrijvingshoek is wat minder gevoelig.
- Bij de hier gehanteerde parameterset is de reductie van de dilatantiehoek door hoge isotrope spanningen gering ten opzichte van de reductie van de dilatantiehoek als functie van de opgetreden schuifrek. Verwacht wordt dat bij hogere stijfheden van het korrelskelet de spanningsafhankelijke softening een grotere rol gaat spelen.
- Na ijking van het rekenmodel kunnen ontwerpgrafieken worden gemaakt, waarbij per situatie de penetratiediepte kan worden afgelezen gegeven de massa en de beginsnelheid van het anker.

Aanbevelingen voor het verdere verloop van het VALANK-project waren:

- Onderzoeken of de massatraagheidseffecten in het rekenmodel inderdaad te verwaarlozen zijn. Voorgesteld wordt om een afschatting hiervan te geven door een berekening voor een bepaalde anker massa en -snelheid te herhalen met massatraagheids krachttjes bepaald uit de snelheidsverandering van grondmassa in de oorspronkelijke berekening.
- Het inbouwen van een spanningsafhankelijke elasticiteitsmodulus in DIEKA.
- Voor vervolgberekeningen een aantal geometrische verfijningen in de mesh door te voeren.
- Vervolgberekeningen uit te voeren met een meer realistische vorm van het anker (conusvorm) en een meer realistische dekking.
- Van vervolgberekeningen de spanningsverdelingen op het tunneldak bepalen en dit in vereenvoudigde vorm terugbrengen, afhankelijk van enkele variabelen. Indien het anker het dak zou raken, dan ook de raaksnelheid bepalen. Hiermee kunnen vervolgens constructieve betonberekeningen worden uitgevoerd van het tunneldak.
- Goed gedefinieerde model- of prototypeproeven narekenen om het rekenmodel na te ijken.

6.2.2. Tweede sessie berekeningen

Na het aanpassen van het programma DIEKA waarbij het mogelijk werd om een spanningsafhankelijke elasticiteitsmodulus in te voeren zijn in eerste instantie vergelijkende berekeningen uitgevoerd, ook nu weer met de valproef voor de Liefkenshoektunnel als uitgangspunt. Ter controle werd eerst een berekening uitgevoerd waarbij de spanningsafhankelijke E-modulus zodanig werd ingevoerd dat in feite een constante E-modulus aanwezig was. De resultaten van deze berekening dienden overeen te komen met de berekeningen in de eerste sessie. Dit was ook het geval. Vervolgens is een berekening uitgevoerd met een variabele E-modulus. Bij de

gekozen waarden bleek de kracht voor een gelijke indringingsdiepte te verdubbelen. Daarna zijn berekeningen¹⁰ uitgevoerd met ankervormen, zoals ook gebruikt zouden worden in de experimentele valproeven. Doordat er problemen ontstonden bij de uitvoering van de berekeningen en de uitgangspunten voor de experimenten tussentijds werden bijgesteld, kwamen de uitgangspunten van berekeningen en valproeven uiteindelijk niet geheel met elkaar overeen. De berekeningen zijn uitgevoerd met vallichamen met een conusvormige punt en een diameter van 1 meter terwijl de proeven zijn uitgevoerd met vallichamen met een diameter van 0,5 meter. De top hoeken van de conusvormige punten waren in berekeningen en proeven gelijk en bedroegen 60° en 120°.

Op grond van de vele berekeningen die met DIEKA zijn uitgevoerd, de eerdere vergelijking van de resultaten met de gegevens die van de proeven bij de Liefkenshoektunnel beschikbaar zijn, en de controle-schattingen met behulp van Brinch Hansen en PLAXIS worden de volgende conclusies getrokken:

- Het programma DIEKA biedt weliswaar mogelijkheden voor analyses van penetrerende ankers in grond, maar de numeriek stabiliteit en de afhandeling van abrupte overgangen in stijfheid tussen opeenvolgende, door de mesh heen bewegende materialen (zeker in twee-fase dan wel fractiemodel berekeningen laat nog te wensen over.
- De geïmplementeerde spanningafhankelijke stijfheid in DIEKA leidde voor de hier onderzochte gevallen voor te grote numeriek instabiliteit, en lijkt op dit moment (nog) niet inzetbaar voor willekeurige geotechnische problemen.
- De nu berekende penetratieverlopen lijken wel realistisch, en de orde van grootte van de krachten en indringdiepten liggen beter bij de resultaten die volgen uit de metingen bij de Liefkenshoektunnel.
- Voor grotere valsnelheden (groter of gelijk aan 5 m/s) is het effect van de massa traagheid van de grond niet meer te verwaarlozen. Uit de beschikbare resultaten kan echter niet worden afgeleid of het verplaatsingsveld door deze massa traagheidskrachten significant wordt beïnvloed.
- Verwacht mag worden dat in die gevallen dat het anker het tunneldak echt raakt dit harde contact maatgevend zal zijn voor de constructie.

De resultaten van deze DIEKA-berekeningen in de vorm van in de tijd verloopende spanningsverdelingen op het tunneldak zijn gebruikt als invoer voor een variantenstudie met het E.E.M.-programma DIANA (zie hoofdstuk 5, par. 3).

6.3. Experimenteel onderzoek penetratie anker

Naast het rekenspoor is door Grondmechanica Delft getracht de indringdiepte van een vallend anker en de drukken op het tunneldak via experimenteel modelonderzoek¹¹ te meten. Bij deze aanpak past niet alleen een verkennende insteek: zien hoe groot de indringing is, maar ook een validerende insteek: nagaan hoe goed het rekenmodel is. De verkennende insteek levert een indruk van de grootte van de gronddrukken en de indringing. De validerende insteek voorziet het rekenspoor van gegevens, waarmee de rekenmodellen kunnen worden getoetst. Met het oog daarop gold als voorwaarde dat de proeven zodanig werden uitgevoerd dat een toetsing van het rekenmodel mogelijk was.

In het rekenmodel is gebruik gemaakt van een axiaal-symmetrische geometrie. De modelproeven werden hierom ook uitgevoerd met axiaal-symmetrische dummy ankers. Daarbij worden grootheden zoals indringing, waterspanning, gronddruk en grondverplaatsing gemeten. Omdat proeven op ware grootte, met anker massa's van 2 tot 10 ton, niet mogelijk waren binnen het gestelde budget is gekozen voor schaalproeven. Door het rekenmodel te ijken op de schaalproeven kan het model een

voorspelling maken van de werkelijke indringing van een niet geschaald dus groot anker.

De twee gestelde doelen van het experimentele onderzoek: hoe groot is de indringing van een anker en hoe groot zijn de gronddrukken tijdens penetratie, reden is vertaald in een aanpak van het modelonderzoek. Meet de grootte van de indringing van en de gronddrukken ten gevolge van twee axiaal-symmetrische dummy ankers (grote conussen) en een echt anker in een laag zand, die de afdekking van het tunneldak modelleert. De dummies staan toe een vergelijking te maken met het rekenmodel. De proef met een echt anker geeft aan in hoeverre de schematisatie van een anker in de vorm van een axiaal-symmetrisch dummy anker (conus) representatief is.

Er zijn drie schaalproeven in de grote modelbak van Grondmechanica Delft uitgevoerd met vallende ankers, twee dummy ankers, bestaande uit grote conussen met een massa van 750 kg en een tophoek van 120° respectievelijk 60° en een poolanker met een massa van ca. 700 kg. De ankers liet men vallen in een laag zand van 0,8 m dik en een relatieve dichtheid van ongeveer 0,4. De bodem van de bak fungeerde als dak van een tunnel, het zand de afdeklaag die op de tunnel is aangebracht. De valsnelheid bedroeg ongeveer 8 m/s.

Uit de proeven zijn de volgende conclusies getrokken:

- De maximale waarde van de extra gronddruk, recht onder het valpunt van het anker, op de bodem van de modelbak, overeenkomend met het dak van de tunnel, is bij het 120° dummy anker vrij hoog: 220 kPa. Bij het 60° dummy anker en het pool anker is de waarde kleiner, ongeveer 80 kPa.
- Een zandpakket met een relatieve dichtheid van 0,4 en een dikte van 0,8 m is bij de thans uitgevoerde proeven voldoende gebleken om de ankers met een massa van 750 kg tegen te houden. Er is geen direct contact tussen het anker en het tunneldak.
- De indringing van het anker is gerelateerd aan de scherpthe van de punt van het anker: hoe scherper hoe dieper.
- De indringing van het anker is gerelateerd aan de oppervlakte van het anker. Hoe groter de oppervlakte, des te lager is de indringing.
- Door het vallen van het anker op het water verliest het enige snelheid, de snelheid bij het indringen in het zandpakket is ongeveer 8 m/s geweest, overeenkomend met de snelheid zoals in de literatuur wordt vermeld.
- De versnelling van het anker en daarmee de kracht op de grond, is niet constant in grootte. Bij indringing van de dummy ankers neemt de versnelling toe, naar mate de punt dieper de grond in wordt gedrukt. Er wordt een maximale waarde bereikt, wanneer de punt geheel in de grond is binnengedrongen. De vertraging van het anker is dan maximaal. Dit komt overeen met een dynamisch maximaal draagvermogen van de grond.
- Bij het poolanker treden mechanische oscillaties op in het versnellingssignaal. De oorzaak daarvan is gelegen in het feit dat het anker uit twee losse stukken bestaat, die door de plotseling optredende versnelling onderling gaan bewegen. Ten gevolge van de mechanische oscillaties kan van het pool anker geen gedetailleerd of nauwkeurig beeld voor de versnelling worden gekregen.
- De extra waterspanning vertoont bij indringing in de grond een compressie piek, de grond wordt aanvankelijk verdicht. De waterspanningsmeters meten dan ten gevolge van hun ligging in het zandpakket, in feite nog voor de punt van het anker.
- Als het anker op enige diepe is aangekomen, wordt wateronderspanning gemeten. Dit uit zich als een dip in de extra waterspanning. De onderspanning wordt geregistreerd als de punt van het anker ongeveer op gelijke hoogte zit als de waterspanningsmeters. De waterspanningsmeters meten ten gevolge van hun ligging in het zand, naast de punt van het anker. Nabij de punt spelen schuifspanningen een belangrijke rol, er treedt daardoor dilatantie op.

- De gemeten horizontale verplaatsingen in de grond kunnen vrijwel volledig (meer dan 80%) worden toegeschreven aan de verplaatsing van grond, ten gevolge van het indringen van het anker, zonder dat verdichting optreedt.
- De verticale verplaatsingen in de grond zijn veel kleiner dan de horizontale verplaatsingen. Dit is een indicatie dat de modelbak voldoende groot was voor de uitvoering van de proeven.
- De verticale verplaatsingen in de grond nabij het vallende anker zijn neerwaarts, overeenkomend met compressie. De verticale verplaatsingen in de grond in het verre veld zijn omhoog gericht. Dit beeld is in overeenstemming met berekeningen.
- Bij de proeven zijn geen onverwacht grote of kleine waarden gemeten, alle waarden lagen binnen het bereik van de opnemers.

7. PARAMETERSTUDIE T.B.V. ONTWERPGRAFIEKEN

In de vierde fase van het onderzoek zijn berekeningen gemaakt met DIEKA. waarbij bleek dat bij het toepassen van dit model nog diverse problemen bestaan die een algemeen gebruik voorlopig nog in de weg staan (laagovergangen met grote stijfheidsverschillen, eigen gewicht van de grond).

Voor het maken van de ontwerpgrafieken¹² is daarom weer teruggegrepen naar het 'strain-path' model. Dit model is waar nodig aangepast en gebruikt voor het uitvoeren van een aantal penetratie berekeningen en de resultaten verwerkt in de ontwerpgrafieken

Bij het uitvoeren van de analyses bleek dat de berekeningsresultaten aan het eind van de indringing een wild slingerend patroon vertonen. Optimalisaties in het programma brachten geen oplossing en omdat verder geen verklaring voor het probleem werd gevonden is voor het bepalen van het penetratiegedrag in het laatste deel van het traject uitgegaan van een extrapolatie van het gedrag in het laatste, nog stabiele deel, van de kracht-indringingsrelatie.

7.1. Gebruik ontwerpgrafieken

In bijlage 1^{t/m} 4 zijn de ontwerpgrafieken gegeven voor ankermassa's van 1, 2, 5 en 10 ton. In bijlage 5 is voor een anker van 10 ton bij een valsnelheid van 10 m/s een voorbeeld gegeven voor het gebruik van de grafieken.

De procedure is als volgt:

- Bepaal de ontwerpuitgangspunten:
 - dikte van aanwezige gronddekking op het tunneldak
 - massa en beginsnelheid van het anker;
- De massa van het anker kan worden afgeleid van het type en grootte van de schepen die van de betreffende waterweg gebruik maken. In [3] worden enkele rekenregels gegeven om de ankermassa bij benadering te bepalen. Voor het bepalen van de beginsnelheid worden in paragraaf 7.2 enkele aanwijzingen gegeven.
- Kies de grafiek met de betreffende dekking.
- Lees in het eerste (rechtsboven) kwadrant van de grafiek af wat de maximale indringing (H_{EIND}) en de eventuele eindsnelheid van het anker is voor de gekozen ontwerpcombinatie anker/beginsnelheid.
- Lees in het tweede (linksboven) kwadrant van de grafiek af wat de maximale kracht tijdens de indringing is (NB. dit is de maximale kracht tijdens de indringing. De grafiek levert geen kracht-indringings relatie).
- Lees in het vierde (rechtsonder) kwadrant van de grafiek af over welk oppervlak van het tunneldak deze kracht werkt. Dit oppervlak wordt cirkelvormig verondersteld.

Begrippen:

beginsnelheid de snelheid [m/s] waarmee het anker de zandlaag raakt
eindsnelheid de snelheid [m/s] waarmee het anker het tunneldak raakt

Omdat de ontwerpgrafieken zijn gemaakt op basis van een serie berekeningen waarbij een aantal invoerparameters zoals de eigenschappen van de afdekgrond en de waterstand boven het tunneldak zijn aangenomen, hebben de grafieken een beperkt geldigheidsgebied. Indien de situatie sterk afwijkt van de waarden die in de grafiek linksonder zijn weergegeven, wordt aangeraden advies bij Grondmechanica Delft te vragen.

7.2. Bepaling beginsnelheid vallend anker

De beginsnelheid is afhankelijk van de massa en vorm van het anker, de initiële snelheid waarmee het anker van het schip valt (in principe is deze nul), de valhoogte boven water en de af te leggen weg in het water. De vorm van het anker is van belang bij het bepalen van de vertraging die het anker ondervindt bij het raken van het wateroppervlak en bij het afdalen in het water. De weerstand die het anker in de lucht ondervindt mag worden verwaarloosd. Ook wordt verondersteld dat het anker tijdens de val niet wordt gehinderd door (een deel van) de ankerketting.

De snelheid waarmee het anker het water treft kan worden uitgerekend met::

$$v = \sqrt{2 g h} \quad [1]$$

Hierin is:

v = snelheid; g = versnelling zwaartekracht = 9,8 m/sec²; h = valhoogte boven water

Tijdens het vallen door de lucht wordt de toename van de valsnelheid enigszins beperkt door de wrijvingsweerstand. Dit is echter te verwaarlozen.

De vertraging die het anker ondervindt bij het raken van het water is afhankelijk van de vorm van het anker en de manier waarop het anker het wateroppervlak raakt.

Tijdens de val door het water verliest het anker nog snelheid ten gevolge van de wrijvingsweerstand van het water. De wrijvingskracht wordt berekend met:

$$F_w = 0,5 \rho C_w A v^2 \quad [2]$$

Hierin is:

F_w = wrijvingskracht; ρ = dichtheid medium (b.v. water $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ of lucht $\approx 1,25 \text{ kg/m}^3$); C_w = wrijvingscoëfficiënt; A = frontaal oppervlak; v = snelheid

De wrijvingskracht en dus het snelheidsverlies t.g.v. wrijving wordt behalve door de dichtheid van het medium en de momentane snelheid ook bepaald door de vorm (C_w) en het frontaal (rekenkundig) oppervlak (A) van het anker. Deze laatste twee parameters zijn voor elk anker verschillend en kunnen in principe alleen d.m.v. experimenten worden vastgesteld. Het ligt echter voor de hand dat kleine ankers minder snelheid zullen verliezen dan grote ankers door een kleiner frontaal oppervlak.

Voor de aanleg van de metrotunnel onder de Maas in Rotterdam^a zijn valproeven gedaan met een anker van 5215 kg vanaf een hoogte van 8 meter boven de waterlijn. De theoretische snelheid van het anker vlak voor het raken van het water is 12,5 m/s. Volgens de metingen was de snelheid direct na het raken van het water ca. 9 m/s. Dit komt neer op een snelheidsverlies van 28%. Gedurende de val door het water nam de snelheid verder af tot een gelijkmatige snelheid van 7 m/s. Deze snelheid werd al bereikt op ca. 1 meter diepte. Het totale snelheidsverlies door het water bedraagt in dit praktijkvoorbeeld dus ca. 45%.

Voor vergelijkbare gevallen kan met behulp van formule 1 en het genoemde snelheidsverlies de beginsnelheid worden bepaald. Bij lichtere, dus kleinere ankers moet het snelheidsverlies worden gereduceerd terwijl bij grotere ankers het snelheidsverlies mag worden vergroot.

^a Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 3, No.4, pp.369-373, 1988

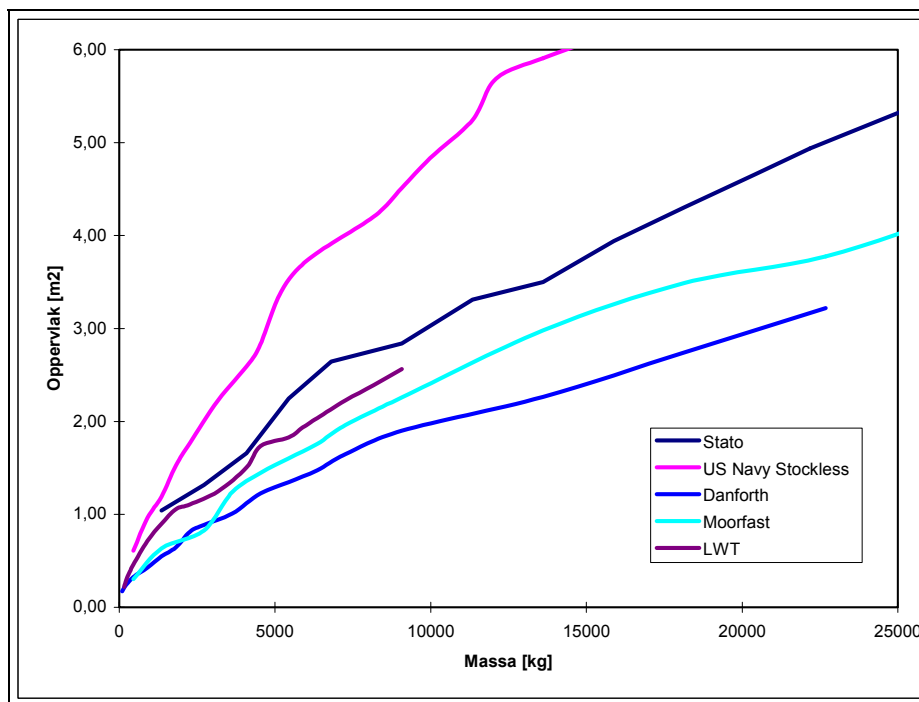
In grafiek 1 is op basis van leveranciersgegevens van een aantal ankertypen het frontaal oppervlak van het anker uitgezet tegen de ankermassa. Hieruit blijkt dat bij ankers tot 10.000 kg er een min of meer lineair verband is tussen massa en oppervlak zodat redelijkerwijs kan worden gesteld:

$$r = 45 m / 5215$$

Hierin is:

r = de gevraagde reductiefactor in %; m = de massa van het gegeven anker in kg

Voor ankers met een grotere massa dan 10.000 kg blijft bij de meeste ankertypen de toename van het oppervlak achter bij de toename van de ankermassa. Omdat dergelijk grote ankers ook buiten de ontwerpgrafieken vallen wordt hier verder niet op ingegaan.



Grafiek 1 Verband tussen ankermassa en oppervlak

8. OVERZICHT RAPPORTEN

- ¹ BSW-rapport nr. 90-11 - De belasting van een tunneldak door een vallend anker - juli 1990 - J.J.M. Schillings
- ² TNO rapport 95-WEC-R0845 - VALANK, literatuurstudie vallend anker op tunneldak - 26 juli 1995 - J.E. van Aanhold e.a.
- ³ BD rapport WB696-R-95002 - Ankers op tunneldaken, een analyse van kansen - 8 november 1995 - R.P. de Leeuw van Weenen
- ⁴ TNO rapport 95-NM-R1483-03 - Vallend scheepsanker op tunneldak; 2-D eindige elementenberekening - december 1995 - W.M.G. Courage e.a.
- ⁵ TNO rapport 96-NM-R0745-04 - Vallend scheepsanker op tunneldak; 3-D eindige elementenberekening - november 1996 - W.M.G. Courage e.a.
- ⁶ TNO rapport 98-NM-R1866; rev 1 - Vallend scheepsanker op tunneldak; een viertal variatie-studies - juli 1999 - J. van den Eikhoff
- ⁷ GD rapport CO-363120/33 - Project VALANK - 22 maart 1996 - J.P. van Schaik
- ⁸ GD rapport CO-363120/55 - Project VALANK; tweede fase - mei 1996 - J.P. van Schaik
- ⁹ GD rapport CO-363120/64 - Project VALANK; fase 3, DIEKA berekeningen - oktober 1996 - A.J. Grashuis
- ¹⁰ GD rapport CO-363120/93 - VALANK; Vallende ankers op tunneldaken - juli 1998 - J.L. Bij nagte
- ¹¹ GD-rapport CO-363120/111 - Project VALANK; Proeven met vallende ankers - april 1998 - H. den Adel
- ¹² GD rapport CO-363120/123 - VALANK; vallende ankers op tunneldaken - maart 1999 - J.L. Bij nagte