

Segmentvoegcapaciteit van de Kiltunnel

Deel 1: Afgezonken tunnels en zettingen



Ivar Schols
1315072
Delft, juni 2012

Voorwoord

Het onderhavige afstudeeronderzoek met de titel *Segmentvoegcapaciteit van de Kiltunnel*, heeft betrekking op bestaande, zandgefundeerde afgezonken betonnen tunnels en legt de focus op dilatatievoegen met een zogenaamde kraagconstructie. Het onderzoeksrapport bestaat uit twee aparte delen:

- Deel 1: Afgezonken tunnels en zettingen
- Deel 2: Capaciteitsbepaling

Het afstudeeronderzoek is uitgevoerd in opdracht van TNO, namens de TU Delft. De begeleidingscommissie bestaat uit de hierna genoemde personen, welke ik hartelijk dank voor de uitstekende begeleiding tijdens mijn onderzoek.

Prof.dr.ir. J.C. Walraven	TU Delft
Dr.ir.drs. C.R. Braam	TU Delft
Dr.ir. C.B.M. Blom	TU Delft
Dr.ir. M.A.N. Hendriks	TU Delft
Dr.ir. A.H.J.M. Vervuurt	TNO

Tijdens het afstudeeronderzoek participeerde ondergetekende in het projectplan Tunnelvormingen van onderzoekscentrum InfraQuest. De onderzoeksgroep bestaat uit de hierna genoemde personen, welke ik hartelijk dank voor de betrokkenheid en hulp bij mijn afstudeeronderzoek: Dr.Ir. K.J. Bakker (TU Delft), Dr.ir.drs. C.R. Braam (TU Delft), Ing. B.H.M. Hendrix PMSE (Rijkswaterstaat), Dr.ir.arch. A.B. Suma (ex-participant TNO), Dr.ir. A.H.J.M. Vervuurt (TNO), Ir. G.M. Wolsink (Rijkswaterstaat). Daarnaast bedank ik de collega's van TNO die mij tijdens mijn onderzoek hebben bijgestaan. Om niemand tekort te doen, noem ik hierbij geen namen.

Mijn grootste dank gaat uit naar mijn ouders, die het voor mij mogelijk hebben gemaakt om de studie Civiele Techniek aan de TU Delft te volgen.

Delft, mei 2012

Ivar Schols

Samenvatting

In 2001 werd een lek geconstateerd in een dilatatievoeg van de Kiltunnel. Volgens [9] zou een tandbreuk de oorzaak zijn geweest, welke is ontstaan door hoge belastingen ten gevolge van zettingen. Daarbij zou de tandwapening niet berekend zijn op dergelijk hoge krachten. Gezien de veronderstelde tandbreuk en andere zetting gerelateerde problemen bij afgezonken tunnels, en daarbij de veroudering van tunnels in het Rijkswegennet in ogenschouw nemende, is het duidelijk dat zettingen het functioneren van tunnels in gevaar kan brengen. Het is daarom van belang om inzicht te krijgen in het gedrag en de capaciteit van de dilatatievoegen onder de invloed van zettingen.

Afgezonken tunnels vinden hun toepassing in rivieren, kanalen en havens waar deze worden gekruist door wegen. Afgezonken tunnels bestaan uit één of meerdere elementen die in een bouwdok worden vervaardigd. De elementen zijn opgebouwd uit meerdere segmenten welke koud tegen elkaar worden gestort zonder mechanische verbinding. De elementen worden voorzien van langsvorspanning om de benodigde buigstijfheid tijdens het transport naar de afzinklocatie te kunnen garanderen. Na het afzinken van de elementen wordt de vorspanning doorgeslepen zodat de segmenten enige verschilzetting- en rotaties kunnen ondergaan en een zogenoemde kettinglijn kunnen vormen.

Bij een afgezonken tunnel zijn drie belangrijke voegen te onderscheiden, te weten: de zinkvoeg, de sluitvoeg en de dilatatievoeg. De zinkvoeg vormt de verbinding tussen de elementen en voorziet in waterafdichting door middel van twee rubberen afdichtingsprofielen; het GINA-profiel dat de waterafdichting verzorgt tijdens het afbouwproces van de tunnel; het Omega-profiel dat de permanente waterafdichting verzorgt tijdens de gebruiksfase van de tunnel. Om aan maattoleranties (denk aan o.a. materialen en elementpositionering) te kunnen voldoen, is extra ruimte benodigd voor het plaatsen van het laatste tunnelement. Om deze reden is de laatste zinkvoeg extra breed en deze wordt daarom ook sluitvoeg genoemd. De verbinding tussen de segmenten zelf wordt dilatatievoeg genoemd. De voornaamste functie van de dilatatievoeg is het toelaten van rotaties door verschilzettingen. Daarnaast heeft de dilatatievoeg als functie het opnemen van axiale vervormingen (onder andere ten gevolge van temperatuureffecten) en het verzorgen van waterdichtheid.

De aanwezigheid van een dwarsopsluiting in de vorm van een kraagconstructie en de afwezigheid van een mechanische verbinding tussen de segmenten laat verschilzetting in beperkte mate toe. Verschilrotatie wordt hierdoor wel toegestaan. In bestaande tunnels bestaat de wapening in de kraagconstructie vaak uit minimum (krimp)wapening. Zetting gerelateerde problemen (onder andere bij de Kiltunnel) waren aanleiding voor het verzwaren van de wapening bij tunnelontwerpen vanaf 2001.

Uit in het verleden verrichte zettingsmetingen blijkt dat bepaalde tunnels verticaal meer verplaatsing ondergaan dan in het ontwerp werd verondersteld. De Kiltunnel wordt als meest sprekende voorbeeld genoemd. Zettingen vinden hun oorsprong zowel in het bouw- en uitvoeringsproces als in de gebruiksfase van de tunnel. Als mogelijke oorzaken van zettingen zijn verdichtingsprocessen van de ondergrond en

wijzigende belasting op de tunnel te noemen. Problemen die zich voordoen als gevolg van zettingen zijn onder andere lekkende voegen, het afboeren van beton en het scheuren van tandconstructies in dilatatievoegen.

Tijdens de levensduur van tunnels worden zettingsmetingen verricht. De coördinaatligging van op de constructie aangebrachte meetpunten wordt op verschillende tijdstippen bepaald. Door deze coördinaatligging te vergelijken met referentiecoördinaten afkomstig van de zogenaamde nulmeting, kan het gedrag van de tunnel als gevolg van de zettingen in kaart worden gebracht. Het aantal herhalingsmetingen, het aantal en de ligging van de meetpunten en het tijdstip van nulmeting zijn aspecten die de mogelijkheid tot analyseren in sterke mate beïnvloeden. Gebrek aan data en aspecten zoals bovengenoemd laat een gedetailleerde analyse van meerdere in aanmerking komende tunnels niet toe.

De uitgewerkte casestudy, de Kiltunnel, beschrijft een zettingspatroon met twee individuele kettinglijnen. In het midden van de tunnel treden de kleinste zettingen op. Bij de andere geanalyseerde tunnels (Heinenoord-, Botlek- en Vlaketunnel) toont de zettingslijn dezelfde overeenkomsten en treedt de kettinglijn niet conform de tijdens het ontwerp gestelde verwachtingen op. Op basis van zettingsgegevens van voorbije jaren is een voorspelling gemaakt van de historische zettingsontwikkeling en het toekomstige zettingsverloop. Hieruit blijkt dat het grootste gedeelte van de zettingen optreedt in de eerste jaren na bouw van de tunnel. De grootte van de zettingen is sterk afhankelijk van lokale omstandigheden van de tunnel (bijv. het tunnelontwerp, de aanwezigheid van een getijdegebied, een gewijzigde bovenbelasting door een dijkteruglegging).

Als gevolg van zettingen roteren de tunnelsegmenten. De krachtsontwikkeling die dit tot gevolg heeft manifesteert zich voornamelijk in de voegen. De grootte van de optredende krachten valt echter niet direct te bepalen uit het zettingsverloop van de tunnel. Bij de Kiltunnel heeft de krachtsontwikkeling geleid tot lekkages bij een dilatatievoeg, welke hoogstwaarschijnlijk werd veroorzaakt door een gescheurde tandconstructie. Uit de zettingsanalyse blijken in de desbetreffende voeg de grootste zetting en rotatie te zijn opgetreden.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	3
Verklarende woordenlijst en afkortingen	6
1 Inleiding	8
1.1 Probleem- en doelstelling	8
1.2 InfraQuest	9
1.3 Tunnels in Nederland	10
2 Afgezonken tunnels	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Bouw van een afgezonken tunnel	12
2.3 Voegen	17
3 Zettingen	23
3.1 Oorzaken	23
3.2 Gevolgen	24
3.3 Zettingsmetingen	25
3.4 Zettingsmechanismen	28
4 Casestudy: Kiltunnel	32
4.1 Inleiding	32
4.2 Zetting	34
4.3 Segmentvoegrotatie	37
4.4 Torsie	39
4.5 Vergelijking met andere tunnels	41
5 Conclusies en aanbevelingen	44
5.1 Kiltunnel	44
5.2 Afgezonken tunnels algemeen	45
5.3 Zettingsmetingen	45
5.4 Optredende krachten	45
6 Referenties	47
Bijlagen	
A Overzicht tunnels	
B Dilatatievoegen	
C Beschikbare meetinformatie	
D Positionering meetpunten Kiltunnel	
E Dwarsdoorsnede zinkelement 2 Kiltunnel	
F Overzicht coördinaatverschillen	
G Zettingsgrafieken	
H Voegrotaties	
I Torsie	

Verklarende woordenlijst en afkortingen

<i>Binnenkraag</i>	Deel van de kraagconstructie dat zich aan de binnenkant van een segment bevindt. De binnenkraag wordt omsloten door de buitenkraag van een aangrenzend segment.
<i>Buitenkraag</i>	Deel van de kraagconstructie dat zich aan de buitenzijde van een segment bevindt. De buitenkraag omsluit de binnenkraag van een aangrenzend segment.
<i>Dilatatievoeg</i>	De voegverbinding tussen twee aangrenzende tunnelsegmenten.
<i>Element</i>	Een tunnelement is een sectie van een tunnel die als één geheel wordt getransporteerd en wordt afgezonken op locatie. Een tunnelement is opgebouwd uit sub-elementen, ofwel segmenten.
<i>GINA-profiel</i>	Waterafdichting tijdens het afzink- en afbouwproces.
<i>Herhalingsmeting</i>	Coördinaatmeting die verricht is op een later tijdstip dan de 0-meting.
<i>Kraagconstructie</i>	Constructief onderdeel van de dilatatievoeg. Bestaat uit zogenaamde tandconstructies rondom de doorsnede in vloer, dak en buitenwanden.
<i>Kopschot</i>	Betonnen plaat aan de primaire en secundaire zijde van een element die de water- en luchtafsluiting van het element verzorgt tijdens opdrijven, transport en afzinken.
<i>Mootvoeg</i>	Zie <i>dilatatievoeg</i> .
<i>Nieuwe data</i>	Zettingsdata van de Kiltunnel van herhalingsmetingen 5 t/m 20.
<i>Nulmeting</i>	Eerst verrichte meting na plaatsing van de meetpunten/meetreflectoren.
<i>Omega-profiel</i>	Waterafdichting tijdens de gebruiksfase.
<i>Oplegkin</i>	Betonnen uitkraging welke is bevestigd aan het kopschot aan de secundaire kant van een element. Hierop wordt de oplegneus opgelegd.

<i>Oplegneus</i>	Betonnen uitkraging welke is bevestigd aan het kopschot aan de primaire kant van een element. Wordt opgelegd op de oplegkin.
<i>Oude data</i>	Zettingsdata van de Kiltunnel van herhalingsmetingen 1 t/m 4.
<i>Primaire zijde</i>	Zijde van een element die tegen een al eerder afgezonken element (of landhoofd) wordt geplaatst.
<i>Secundaire zijde</i>	Tegenoverliggende zijde van de primaire zijde.
<i>Segment</i>	Onderdeel van een tunnelement (subelement).
<i>Segmentvoeg</i>	Zie <i>dilatatievoeg</i> .
<i>Shear key</i>	Constructieve verbinding voor het overbrengen van hoofdzakelijk dwarskracht.
<i>Sluitvoeg</i>	De constructieve verbinding tussen het laatst afgezonken element en het daaraan grenzende element.
<i>Tandconstructie</i>	Zie kraagconstructie.
<i>X-as</i>	Dwars-as van een segment.
<i>Y-as</i>	Lengte-as van een segment.
<i>Zetting</i>	Het verschil in verticale positie/coördinaatligging van een meetpunt in een bepaald tijdsinterval. Kan zowel positief of negatief van grootte zijn.
<i>Vrijboord</i>	De verticale afstand van de waterspiegel tot het hoogste punt van een tunnelement boven de waterspiegel tijdens transport.
<i>Zinkvoeg</i>	De constructieve verbinding tussen twee tunnelementen of de verbinding tussen een tunnelement en een landhoofd.

1 Inleiding

1.1 Probleem- en doelstelling

In het constructief ontwerp van tunnels wordt uitgegaan van een levensduur van 70-100 jaar voor de civiele delen. Daarnaast werd in ontwerpen in het verleden (voornamelijk voor 2001) de aannahme gedaan dat er geen noemenswaardige vervormingen zouden optreden tijdens de gebruiksfase van de tunnel. Binnen de komende 10 jaar bereikt ongeveer 30% van de tunnels in Nederland een leeftijd van 50 jaar of meer. De afgezonken tunnel onder de Dordtsche Kil (de Kiltunnel) is één van de voorbeelden waar in de praktijk problemen zijn opgetreden. Dit mag blijken uit het volgende citaat:

In 2001 werd een (groot) lek geconstateerd in een dilatatievoeg ter plaatse van de buitenwand aan de zuidkant van de Kiltunnel. Een onderzoeksteam werd ingesteld. Conclusie was dat de deformatie ten gevolge van zetting van de tunnelmotten leidde tot een tandbreuk in de dilatatievoeg, waardoor lekkage en zandtransport buiten om het rubberprofiel is opgetreden. De wapening van de vertanding is niet berekend op krachten als gevolg van dergelijk grote zettingen. De dimensionering van de segmentvoegen is hoofdzakelijk gebaseerd op krachten in verticale richting en niet op (grote) rotaties. Als een tunnelelement oplegkrachten van een naast gelegen tunnelelement over moet nemen, zijn deze krachten zo groot dat daar eigenlijk niet tegen te wapenen valt. De lijnbelasting veroorzaakt een tandbreuk. Hoe groot deze is, weten we niet. [9]

Of de waargenomen lekkage bij de Kiltunnel daadwerkelijk door een tandbreuk is veroorzaakt, is niet met zekerheid te zeggen. Er heeft immers geen visuele confirmatie plaatsgevonden. Naast het leezand en –water dat de tunnel instroomde, kan een tandbreuk leiden tot corrosieproblemen waardoor de levensduur van de tunnel wordt beïnvloed. Een ander mogelijk gevolg van zettingen is het afboeren/afbrokkelen en scheuren van beton door te grote randspanningen. Gezien de genoemde problemen en daarbij de veroudering van tunnels in het Rijkswegennet in ogenschouw nemende, is het duidelijk dat ongelijkmatige vervormingen zoals zettingen, het functioneren van tunnels in gevaar kan brengen. Het is dan ook onzeker of de eerder genoemde aannamen met betrekking tot de vervormingen (nog steeds) geldig zijn. Het is daarom van belang om inzicht te krijgen in het gedrag en de capaciteit van de dilatatievoegen onder de invloed van zettingen.

In dit eerste deel van het onderzoek wordt een voorstudie gepresenteerd met betrekking tot afgezonken tunnels. Hierin wordt het bouw- en afzinkproces beschreven, een analyse met betrekking tot verschilzettingen gedaan en er wordt een tunnel gekozen als casestudy voor verdere analyse (de Kiltunnel). Van deze tunnel worden extreme waarden van zettingen en rotaties bepaald. In het tweede deel van het onderzoek wordt de krachtsverdeling in de Kiltunnel en de capaciteit van de segmentvoeg onderzocht, evenals de invloed van diverse tunnelkarakteristieken op de capaciteit.

1.2 InfraQuest

Infraquest is een samenwerkingsverband tussen de Technische Universiteit Delft, Rijkswaterstaat en TNO, waarbinnen onderzoek wordt verricht naar het vervormingsgedrag van tunnels in het Nederlandse hoofdwegennet. Het onderzoek richt zich in het bijzonder op afgezonken betonnen tunnels die zijn gefundeerd op zand en een verdeuveling tussen de segmenten bezitten in de vorm van een kraagconstructie. Eén van de in het onderzoek genoemde problemen betreft verticale (verschil)vervormingen. Uit in het verleden verrichte metingen blijkt dat bepaalde tunnels verticaal meer verplaatsing ondergaan dan in het ontwerp werd verondersteld. De Kiltunnel wordt als meest sprekende voorbeeld genoemd. In het kader van dit projectplan is een overzicht gemaakt van afgezonken tunnels in het beheer van Rijkswaterstaat waar vervormingsmetingen aan zijn verricht, zie Tabel 1. Het onderhavige afstudeeronderzoek levert een bijdrage aan het project van InfraQuest.

Tunnel	Rijksweg	Opening	Elementen – lengte [m]	Segmenten – lengte [m]	Doorsnede B x H [m ²]
Coentunnel	A 10	1966	6 – 90	5 – 18,0	23,9 x 7,8
1e Beneluxtunnel	A 4	1967	8 – 93	5 – 18,6	23,9 x 7,9
Heinenoordtunnel	A 29	1969	5 – 115	6 – 19,0	30,7 x 8,8
Vlaketunnel	A 58	1975	2 – 125	6 – 20,9	29,8 x 8,0
Drechtunnel	A 16	1977	3 – 112	6 – 18,8	49,0 x 8,1
Kiltunnel	N217/N3	1977	3 – 110	5 – 22,3	31,0 x 8,8
Prinses Margriet tunnel	A7	1977	1 – 77	4 – 19,5	28,5 x 8,0
Botlektunnel	A 15	1980	4 – 105 1 – 88	6 – 17,5 5 – 17,5	30,9 x 9,0
Zeeburgertunnel	A 10	1990	3 – 110	5 – 22,0	29,8 x 7,8
Noordtunnel	A15	1992	3 – 130 1 – 110	5 – 25,0 4 – 25,0	30,0 x 8,0
Wijkertunnel	A 9	1996	6 – 93	4 – 25,0	31,8 x 8,1
2e Beneluxtunnel	A 4	2002	6 – 140	7 – 20,0	45,3 x 8,5
Calandtunnel	A 15	2004	6 – 114	5 – 22,8	34,0 x 8,5
Roertunnel	A 73	2008	2 – 158 2 – 136	7 – 22,5 6 – 22,5	25,1 x 7,8
Swalmentunnel	A 73	2008	–	–	–

Tabel 1: Afgezonken tunnels op een zandfundering in het beheer van Rijkswaterstaat

1.3 Tunnels in Nederland

De Maastunnel is de eerst gebouwde tunnel in Nederland. Het is een afgezonken tunnel waarvan de bouw begon in 1937. De ingebruikname van de tunnel volgde in 1942. De Maastunnel bestaat uit 9 apart afgezonken elementen met een lengte van ongeveer 61 m en een dwarsdoorsnede van $25 \times 8,5 \text{ m}^2$. Zoals Tabel 1 laat zien, is de elementlengte hedendaags toegenomen. De buitenafmetingen van de dwarsdoorsneden zijn in dezelfde orde van grootte gebleven.

Momenteel zijn er in Nederland 57 tunnels. Het betreft verkeers- en spoortunnels. Voor een overzicht van de tunnels inclusief een tijdslijn met jaar van ingebruikname wordt verwezen naar bijlage A. Tunnels kunnen op vele manieren worden onderscheiden, waarvan de bouwwijze als één van de meest karakteristieke kan worden beschouwd. Qua bouwwijze zijn er vier soorten tunnels te onderscheiden (tussen haakjes staat aangegeven hoeveel tunnels er per bouwmethode zijn in Nederland):

- Afgezonken tunnels (24)
- Open bouwkuip tunnels (19)
- Boortunnels (10)
- Landtunnels¹ (4)

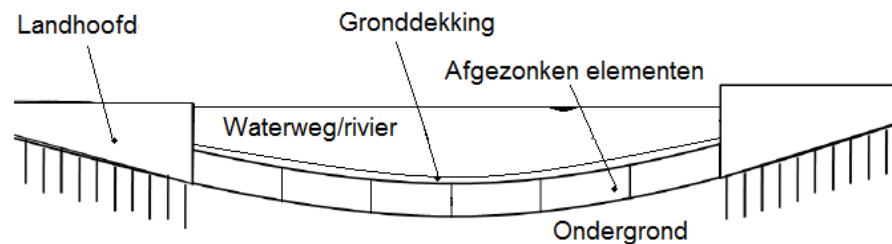
¹ In situ gebouwd

2 Afgezonken tunnels

2.1 Inleiding

Afgezonken tunnels vinden hun toepassing voornamelijk in rivieren, kanalen en havens waar deze worden gekruist door wegen. Afgezonken tunnels bezitten een aanzienlijk drijfvermogen en zijn daarom technisch gesproken lichtgewicht constructies. Dit drijfvermogen is aanwezig doordat het gewicht van het verplaatste water relatief hoog is ten opzichte van het gewicht van de tunnel dat daarvoor in de plaats komt. Door dit fenomeen blijft de funderingsdruk tot een minimum beperkt. Afgezonken tunnels zijn daarom onder andere geschikt voor gebieden met zwakke grondcondities, zoals gebieden met klei- en veengronden.

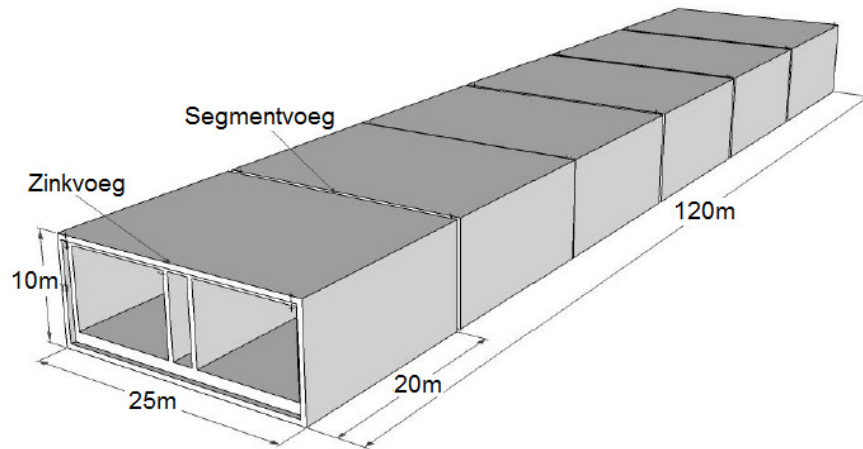
De gehele tunnelconstructie zelf bestaat uit een afgezonken gedeelte dat aansluit op landhoofden. De toeritten kunnen bestaan uit open en/of gesloten secties en kunnen deel uitmaken van de landhoofden. In Figuur 1 is een zijaanzicht weergegeven van een afgezonken tunnel bestaande uit zes elementen.



Figuur 1: Zijaanzicht afgezonken tunnel

Een afgezonken tunnel kan uit één element bestaan, maar bestaat gewoonlijk uit meerdere elementen die met elkaar zijn verbonden. De gebruikelijke lengte van de elementen ligt tussen de 100 m en 150 m. Er zijn echter uitzonderingen zoals bij de Hemspoortunnel, waar de elementen meer dan 250 m lang zijn. De lengte van de elementen is onder andere afhankelijk van de te verwachten belasting tijdens transport en afzinken en van de gehele tunnallengte. De elementlengte kan tevens zijn begrensd door de minimale breedte van de te passeren vaargeul.

De elementen bestaan uit een aantal segmenten/moten. Deze zijn gebruikelijk tussen de 18 m en 25 m lang. De lengte is gebaseerd op de beperking van scheurvorming tijdens het verhardingsproces van de betonspecie. De segmenten worden koud tegen elkaar gestort. Door de segmentale manier van bouwen kunnen temperatuurkrimp en verschilzettingen ten gevolge van variërende stijfheid in de ondergrond in enige mate worden opgevangen in het stadium na plaatsen van de elementen op hun eindpositie. In Figuur 2 wordt een tunnelement met karakteristieke afmetingen weergegeven.



Figuur 2: Tunnelement bestaande uit zes segmenten. Naar: [27]

2.2 Bouw van een afgezonken tunnel

2.2.1 *Bouw van de elementen*

Startpunt voor het ontwerp van de tunneldoorsnede is de benodigde vrije ruimte. Deze hangt onder andere af van de te verwachten verkeersintensiteit en het soort verkeer dat van de tunnel gebruik zal gaan maken. Bij het ontwerp van de elementen is het vrijboord een belangrijk aspect. Het vrijboord is de verticale afstand van de waterspiegel tot het hoogste punt van een tunnelement boven de waterspiegel tijdens transport. Het zo klein mogelijk houden van het vrijboord biedt de volgende voordelen:

- Een laag liggend zwaartepunt van de elementen, wat meer stabiliteit geeft tijdens opdrijven en transporteren.
- Een minimaal benodigde ballast voor afzinken.
- Een minimum funderingsdruk wanneer de elementen op hun permanente locatie liggen.

De elementen van afgezonken tunnels worden in een bouwdok gefabriceerd. Gebruikelijke bouwplaatsen zijn (oude) scheepsdokken of tijdelijke dokken ter plaatse van de tunneltoeritten en speciaal gemaakte bouwdokken nabij de afzinklocatie. De elementen worden gebouwd op een grindbed om voldoende opwaartse druk te genereren tijdens het opdrijven. Gelijktijdig aan de bouw van de elementen wordt een sleuf gebaggerd in de zee- of rivierbodem waar de elementen in een later stadium in afgezonken worden. Deze sleuf wordt zinksleuf genoemd.

Door temperatuurveranderingen tijdens de gebruiksfase zal het beton willen uitzetten of krimpen. Indien deze bewegingen worden verhinderd, leidt dit tot druk- respectievelijk trekspanningen in de constructie. Een drukspanning kan goed worden opgenomen door het beton. Een drukspanning heeft zelfs een gunstige werking indien scheurtjes worden dichtgedrukt (denk hierbij aan waterdichtheid). Een trekspanning daarentegen kan leiden tot scheuren in de constructie. Onder werking van de waterdruk van buitenaf kunnen scheuren watervoerend worden.

Door de tunnelementen op te delen in segmenten, wordt de trekspanning in de constructie beperkt en treden bovengenoemde negatieve effecten niet of in mindere mate op. Het voegvlak tussen twee segmenten wordt dilatatievoeg genoemd. Om vrije vervorming te kunnen ondergaan, loopt de wapening van de segmenten niet door in de stornaden van de dilatatievoeg. De segmenten worden koud tegen elkaar gestort. Om aanhechting tussen de segmenten te voorkomen moet het voegoppervlak van het al gestorte segment glad zijn en vervolgens met bitumen worden besmeerd. Daarna wordt het volgende segment ertegenaan gestort.

De segmenten worden in het bouwdok met elkaar verbonden door middel van voorspanning in langsrichting. De voorspanning bevindt zich hoofdzakelijk in de vloer- en dakplaat. De hoeveelheid voorspanning wordt bepaald door de belastingen die tijdens opdrijven, transport, afzinken en gereed maken van de fundering op de elementen werken. Door de voorspanning werken de segmenten samen waardoor het betreffende element als het ware één constructief geheel vormt en zich stijver gedraagt. Op deze manier wordt de benodigde buigsterkte voor transport naar de afzinklocatie verkregen. De voorspanning zorgt ook voor een minimale drukspanning in de segmentvoegen waardoor de waterdichtheid gegarandeerd is. Dwarsvoorspanning wordt gebruikelijk vermeden vanwege de gecompliceerde detaillering.

Als alle segmenten zijn gestort, vormen de kopschotten de water- en luchtdichte afsluiting van tunnelementen (Figuur 3). Deze afsluiting is benodigd om de elementen drijfvermogen te geven en daardoor transport mogelijk te maken. Door de toepassing van kopschotten wordt de aanvankelijk open elementdoorsnede als het ware een gesloten doos. De kopschotten bestaan uit betonnen platen die ondersteund worden door stalen HE-profielen.

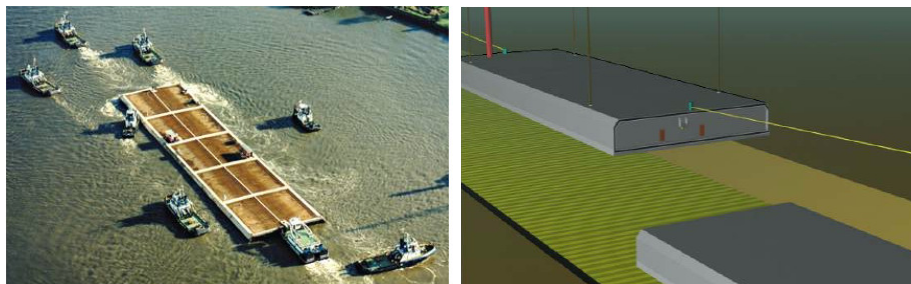


Figuur 3: Kopschot met oplegneuzen [34]

2.2.2 Afzinkproces

Als alle bouwactiviteiten aan de buitenkant van een element zijn voltooid, kan het bouwdok gevuld worden met water. De elementen gaan drijven en na het openen van het bouwdok kunnen ze met behulp van sleepboten worden getransporteerd naar de afzinklocatie. De meest gebruikelijke methode voor het daadwerkelijke afzinken van de elementen is met de hulp van afzinkpontons, dit zijn drijvende platformen. Tijdens het afzinken kunnen de elementen zowel horizontaal als

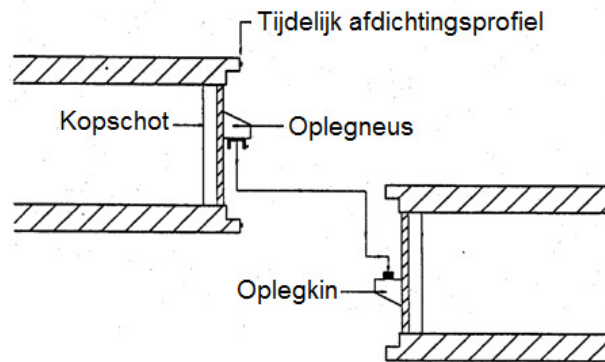
verticaal worden gestuurd met behulp van kabels en lieren waarmee ze aan de pontons zijn verbonden. Het benodigde gewicht voor afzinken wordt verkregen door water in vooraf geplaatste ballasttanks te laten lopen. Door de ballasttanks geleidelijk aan te vullen, krijgt het element steeds meer diepgang en kan het afzinkproces gecontroleerd worden uitgevoerd (Figuur 4).



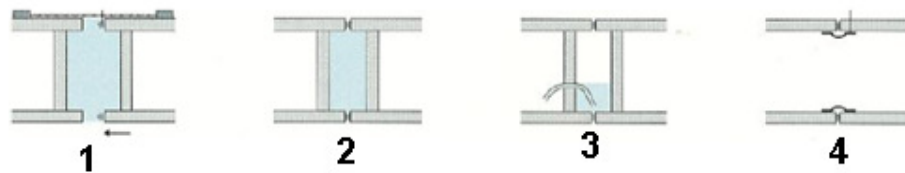
Figuur 4: Links: transporteren van een afzinkelement. Rechts: Positionering van een afzinkelement [6]

Het te positioneren element bezit een oplegneus die wordt opgelegd op de oplegkin van het al geplaatste element. De neus-kin constructie (Figuur 5) is van beton of staal gemaakt. Met behulp van vijzelpennen tussen de oplegneus en –kin wordt de gewenste positie in verticale richting verkregen. Door de plaatsing van de elementen heeft het GINA-profiel (zie 2.3.1) een eerste indrukking ondergaan en een waterdichte afdichting is gerealiseerd. Een zojuist afgezonken element wordt tijdelijk gedragen door verticaal gerichte vijzelpennen die afdragen naar de bodem via op de bodem geplaatste funderingstegels. De vijzelpennen zijn gepositioneerd onder de buitenwanden aan de secundaire zijde van het element.

Wanneer het zojuist afgezonken element de gewenste positie heeft bereikt tegen het voorgaande element aan, is tussen de elementen een ingesloten ruimte met water gecreëerd. Deze ruimte wordt zinkkamer genoemd, zie afb. 2 in Figuur 6. Door het leegpompen van de zinkkamer (afb. 3) ontstaat een drukverschil tussen de secundaire zijde waar een waterdruk heerst en de primaire zijde waar nu de waterdruk ontbreekt. De primaire zijde is de zijde van een element die tegen een al eerder afgezonken element (of landhoofd) wordt geplaatst. De tegenoverliggende zijde heet de secundaire zijde. De gegenereerde overdruk zorgt voor een voorspanning waardoor de elementen nog sterker tegen elkaar worden gedrukt. Uiteindelijk wordt het zojuist afgezonken element tegen het voorgaande element aangetrokken met behulp van op het dak geïnstalleerde horizontaal gerichte vijzels en neemt het GINA-profiel zijn uiteindelijk gewenste vorm aan waardoor de waterafdichting optimaal is. Nu worden de kopschotten verwijderd en wordt het Omega-afdichtingsprofiel aangebracht, zie afb. 4 in Figuur 6.



Figuur 5: Plaatsing van afzinkelement



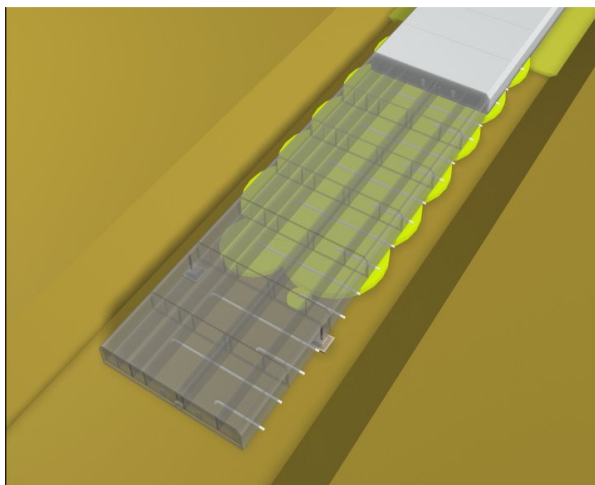
Figuur 6: 1; positionering element. 2; aansluiten element. 3; leegpompen zinkkamer. 4; verwijderen kopschotten en aanbrengen Omega-profiel. [7]

Tunnelementen die aansluiten op een landhoofd, wordt doorgaans een overhoogte gegeven van ongeveer 50 mm. De landhoofden worden gebouwd op zetting-ongevoelige ondergrond of anders gefundeerd op palen. De overhoogte moet er voor zorgen dat het profiel van vrije ruimte van de tunneldoorsnede behouden blijft na het ondergaan van zettingen van de elementen ten opzichte van het landhoofd.

2.2.3 Werkzaamheden na afzinken

Na het afzinken en positioneren van de elementen wordt een fundering gerealiseerd. Er zijn verschillende methoden voor fundering van afgezonken tunnelementen; de onderspoelmethode, de onderstroommethode, een grindbedfundering en een paalfundering. Gezien de onderspoelmethode de meest toegepaste methode is in Nederland en omdat het onderhavige onderzoek de focus legt dit type fundering, wordt deze navolgend besproken.

Bij de onderspoelmethode wordt zand via vooraf in het element gestorte leidingen in de ruimte tussen de bodem van de zinksleuf en de onderkant van het tunnelement geïnjecteerd. De plaatsing van deze leidingen is zodanig dat een regelmatig patroon van “zandpannenkoeken” wordt verkregen, zie Figuur 7. Het is echter niet gegarandeerd dat het zand alle hoeken volledig bereikt waardoor verschillen in stijfheid van de fundering niet uitgesloten kunnen worden. Afhankelijk van de configuratie van het leidingenstelsel worden na het injecteren de leidingen dichtgelast en geïnjecteerd. Op deze manier wordt de afsluiting tussen buiten- en binnenkant van de elementen gewaarborgd.



Figuur 7: Fundering met de onderspoelmethode [36]

Nadat de fundering gereed is en de elementen hierop dragen, kunnen de tijdelijke ondersteuning (vijzels) worden afgelaten. Om in de permanente positie negatief drijfvermogen te behouden, wordt het ballastwater verwijderd en daarvoor in de plaats ballastbeton aangebracht. De meest gebruikelijke manier is het aanbrengen van ballastbeton op de tunnelvloer. Ter plaatse van de voegen (zink-, sluit- en segmentvoeg) wordt in eerste instantie geen ballastbeton aangebracht. De reden hiervoor is de benodigde ruimte voor de voegafbouw. In het ontwerp van een afgezonken tunnel wordt ballastbeton alleen als belasting in rekening gebracht; in berekeningen draagt het dus niet bij aan de constructieve sterkte.

Na het ballasten van de elementen worden de voorspankabels tussen de segmenten doorgeslepen. De voornaamste reden voor het doorslijpen van de voorspanning is het voorkomen van hoge belastingen (met name buigende momenten) in de elementen, voornamelijk in de voegen. Zouden de voorspankabels niet worden doorgeslepen, dan blijven de elementen in langsricting één star constructief geheel. Bij plaatselijke verschillen in beddingstijfheid kan de grond dan niet overal de gewenste tegenreactie leveren. Mogelijk gevolg is dat (een deel van) de belasting afkomstig van een segment wordt afgedragen op aangrenzende segmenten waardoor de segmentvoeg een grotere dwarskracht krijgt te verduren. Door het doorslijpen van de voorspanning kunnen de segmenten enige zetting en rotatie ten opzichte van elkaar ondergaan. Het is de bedoeling dat ze hierdoor afzonderlijk kunnen gaan afdragen op de bodem waarbij een zogenaamde “kettinglijn” ontstaat. Hierdoor zouden bovengenoemde negatieve effecten zoals potentiële (hoge) buigende momenten in langsricting en hoge belastingen op de voegen van de elementen voorkomen worden. Na het doorslijpen van de voorspankabels wordt ook ter plaatse van de segmentvoegen ballastbeton aangebracht.

Eén van de laatste fasen bestaat uit het afwerken van de zinkvoegen en het realiseren van de sluitvoeg welke een permanente waterafdichting moet verkrijgen door het aanbrengen van het Omega-profiel.

Met het aanvullen van de zinksleuf kan al worden begonnen als nog niet alle elementen zijn afgezonken, zie Figuur 8. Bij het aanvullen van de zinksleuf is speciale aandacht vereist voor de verschilhoogte van de grond aan beide zijden van de tunnelementen. Om horizontaal verschuiven van de elementen te voorkomen, moet het hoogteverschil beperkt blijven tot maximaal 1 m. Naast de aanvulling aan de zijanten wordt bovenop de afgezonken tunnel een gronddekking aangebracht, meest gebruikelijk in de vorm van een laag zand van 1 a 2 m met daarbovenop nog een bescherm laag. Men moet zich bij het ontwerp van een afgezonken tunnel terdege realiseren dat de gronddekking een extra verticale belasting teweeg brengt.



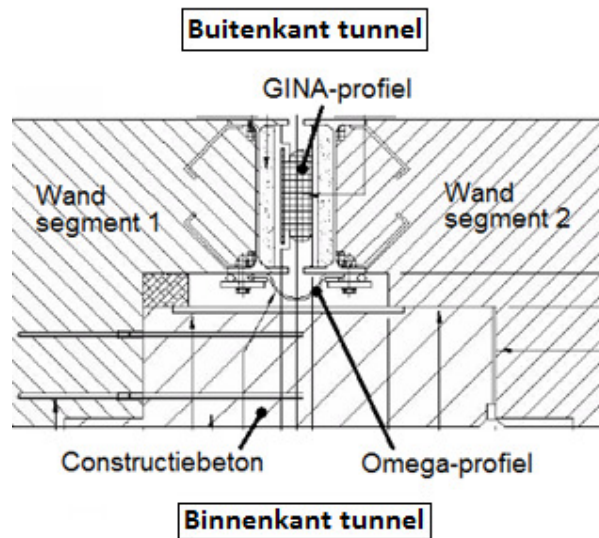
Figuur 8: Gedeeltelijk aangevulde zinksleuf [33]

2.3 Voegen

2.3.1 Zink- en sluitvoeg

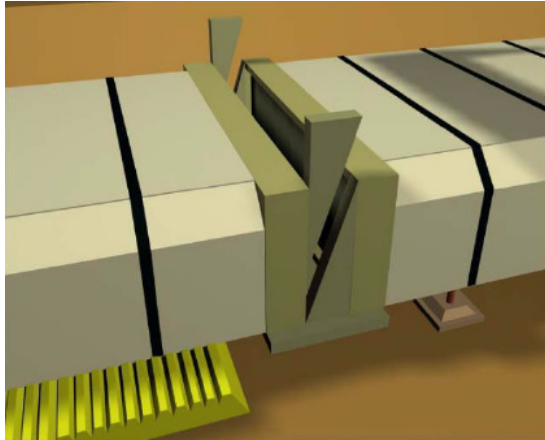
Een zinkvoeg is de verbinding tussen twee tunnelementen of de verbinding tussen een tunnelement en een landhoofd. In Figuur 9 is een voorbeeld te zien van een zinkvoeg waarin ook de waterafdichtingsprofielen worden genoemd. De belangrijkste functies van de zinkvoeg zijn:

- de voorziening van een waterdichte afsluiting tussen de elementen.
- het toestaan van geringe bewegingen loodrecht op het voegvlak.
- het toestaan van geringe rotaties tussen aangrenzende elementen.



Figuur 9: Zinkvoeg in een buitenwand [naar: SATO RWS]

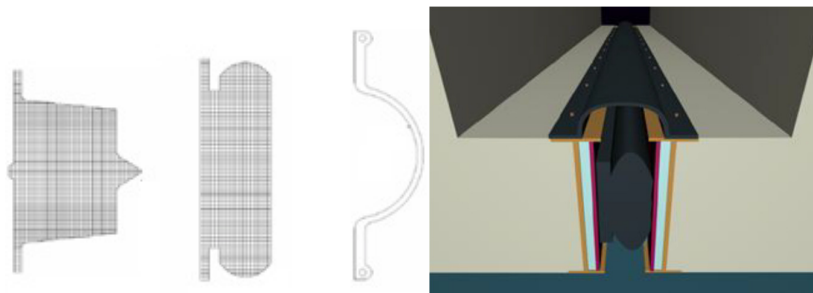
Om aan maattoleranties (materialen, elementpositionering) te kunnen voldoen, is extra ruimte benodigd voor het plaatsen van het laatste tunnelelement. Wanneer alle elementen zijn afgezonken, blijft er een opening aanwezig van ongeveer 1 – 1.5 m tussen het laatst geplaatste element en het daaraan grenzende element. Om deze reden vereist de verbinding tussen de elementen die de opening feitelijk sluit, speciale aandacht. Deze laatste voeg wordt dan ook sluitvoeg (de laatste zinkvoeg) genoemd. De sluitvoeg kan ook liggen tussen een element en een landhoofd. Dit is echter minder gebruikelijk gezien de benodigde ruimte voor realisering en afwerking van de voeg. Tevens is de zetting tussen landhoofd en aansluitend tunnelelement vaak altijd groter dan de zetting tussen elementen (gezien de landhoofden op palen zijn gefundeerd) waardoor de meer flexibele voeg meestal tussen twee elementen wordt geplaatst. De sluitvoeg moet kunnen voorzien in dezelfde functies als de zinkvoeg. Bij sommige ontwerpen van tunnels worden speciale wigconstructies toegepast tussen de elementen, zie Figuur 10. Een dergelijke wigconstructie moet het tegen elkaar aandrukken van de elementen tijdens het leegpompen van de zinkkamer begrenzen om ongewenste vervorming van de elementen te voorkomen.



Figuur 10: Wigconstructie van de sluitvoeg [6]

De waterafdichting van de zink- en sluitvoeg wordt verkregen door twee onafhankelijk van elkaar werkende waterdichtheidsprofielen (Figuur 11) welke rond de gehele tunneldoorsnede over de voeg doorlopen:

- *GINA-profiel*: Het GINA-profiel moet voorzien in waterafdichting van de elementen direct na het afzink- en plaatsingsproces. Het GINA-profiel wordt ook wel secundaire afsluiting genoemd en bevindt zich in het bouwdok aan de primaire zijde van een tunnelelement.
- *Omega-profiel*: Het Omega-profiel is een rubberen afsluiting die in waterdichting moet voorzien wanneer de tunnel klaar is voor afbouwwerkzaamheden en tijdens de gebruiksfase. Het profiel is aan de binnenkant van de zinkvoeg aanwezig en wordt in de elementen gebetonneerd. Hierdoor is controle van de correctheid van plaatsing alleen achteraf mogelijk door met het blote oog te inspecteren. Om het Omega-profiel heen wordt een beschermende constructie gebouwd, waarna de wapening en andere voorzieningen kunnen worden aangebracht. De laatste stap van de voegafwerking bestaat uit het storten of spuiten van beton.

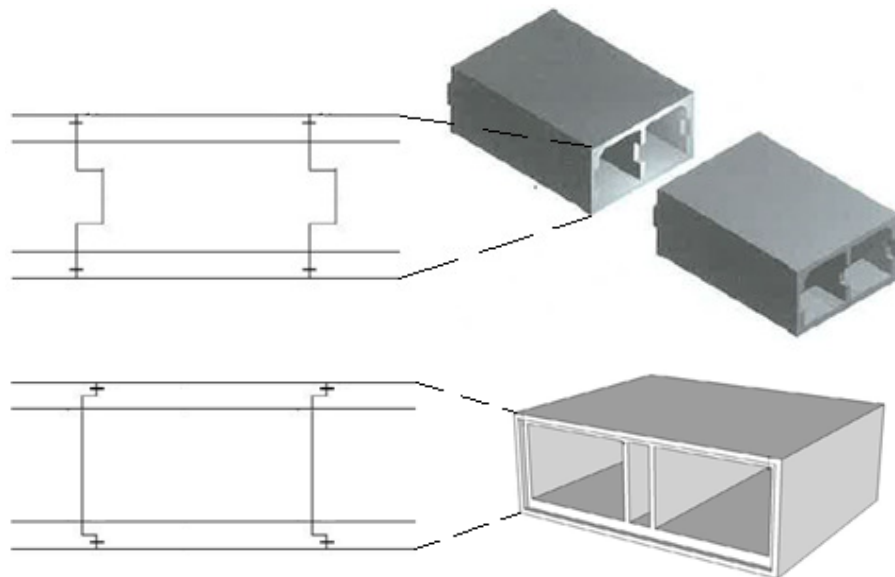


Figuur 11: Van links naar rechts: GINA-profiel, GINA-profiel na aansluiting elementen, Omega-profiel [6], afdichtingsprofielen in een zinkvoeg [8]

2.3.2 Dilatatievoeg

De verbinding tussen twee op elkaar aansluitende segmenten wordt dilatatievoeg genoemd. Andere benamingen zijn segmentvoeg, segmentverbinding, mootvoeg of mootverbinding. De belangrijkste functies van de dilatatievoeg zijn het opnemen van vervormingen loodrecht op de tunneldoorsnede (onder andere ten gevolge van temperatureffecten), het toestaan van geringe rotaties om de dwars-as (X-as) tussen segmenten en het verzorgen van waterdichtheid van de tunnel.

Een “shear key” (dwarsopsluiting) moet verticale verplaatsing door verschilzettingen tussen segmenten verhinderen en de ingeleide dwarskracht kunnen opnemen. Om zo goed mogelijk aan deze functie te kunnen voldoen, dient het oplegvlak van de shear key horizontaal te zijn. In Figuur 12 zijn voorbeelden van segmentvoegen met shear keys te zien.



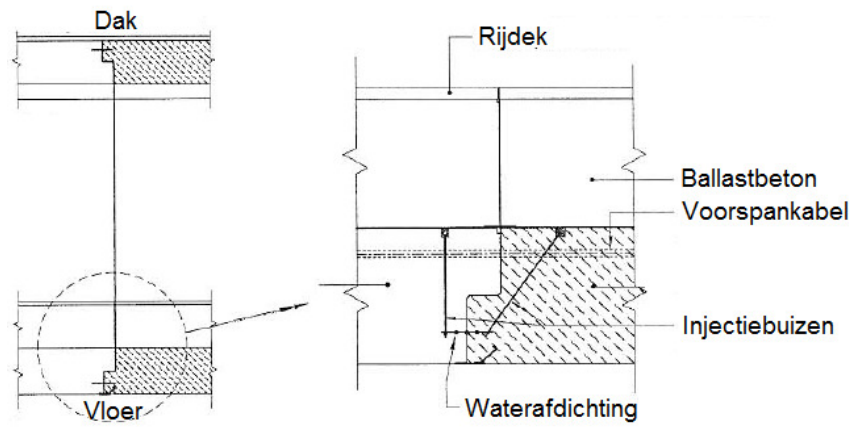
Figuur 12: Segmentvoegen. Boven: tunnelsegment met tandverdeueling in de wanden. Onder: tunnelsegment met kraagconstructie rondom de doorsnede.

De kraagconstructie is de meest voorkomende shear key bij tunnels in Nederland. Bij de kraagconstructie is de shear key gelegen in de buitenste wanden, dak en vloer. Door deze ligging is de segmentvoeg in staat in enige mate dwarskracht en torsie over te brengen en rotatie te ondergaan. De krachtsoverdracht per belastinggeval (denk aan dwarskracht, torsie en buiging) moet in twee richtingen kunnen plaatsvinden. Binnenwanden hebben geen kraagconstructie wat logisch lijkt om de volgende redenen: bij binnenwanden is er geen gevaar voor het indringen van water en tevens zal een kraagconstructie in de binnenwanden relatief weinig bijdragen aan de rotatie- en torsiecapaciteit gezien het massa-zwaartepunt van de wanden min of meer gelijk valt met het massa-zwaartepunt van de tunneldoorsnede. Om de rotaties zonder problemen toe te staan, mag het oplegvlak van de kraagconstructie niet te breed zijn. Het oplegvlak is bij de meeste tunnels 250 mm breed (lengtemaat in zij aanzicht). In sommige gevallen is dit maximaal 300 mm. Eén segment bevat een binnenkraag aan het ene uiteinde, welke geheel

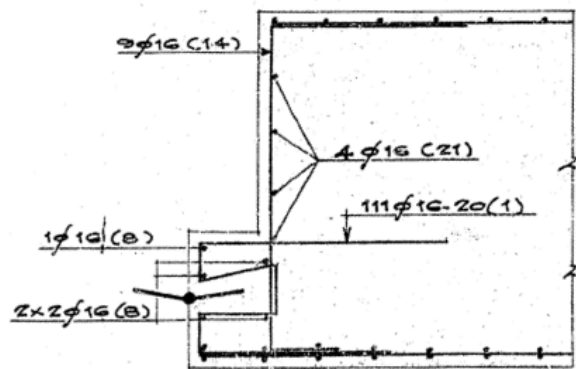
omsloten wordt door de buitenkraag van het aangrenzende segment. Aan het andere uiteinde bevat het segment een buitenkraag welke op zijn beurt de binnenkraag van het aangrenzende segment aan die kant zal omsluiten.

De dilatatievoeg is een voeg zonder doorvoer van wapening om de eerder genoemde voegbewegingen vrij te laten optreden. Bij vroegere ontwerpen heerste de opvatting dat de shear key geen noemenswaardige krachten te verduren zou krijgen tijdens de gebruiksfase van de tunnel. De kraagconstructies zijn veelal berekend op een oplegdruk van 500 kg/m^2 . Er was geen rekening gehouden met de oplegkrachten die kunnen ontstaan door een herverdeling van krachtsafdracht tussen de segmenten. Verschilzetting tussen segmenten wordt als mogelijke oorzaak genoemd van een dergelijke herverdeling. Hierdoor kan de belasting van meerdere segmenten komen te rusten op één kraag. Bij de meeste afzinktunnels in Nederland (veelal tunnels van voor 2000) bestaat de wapening rond de dilatatievoegen alleen uit praktische krimpwapening. De meest voorkomende wapeningsconfiguratie in de kraagconstructie in tunnels van voor 2000 is $\phi 16 - 200$ en zelfs $\phi 12 - 200$ werd regelmatig toegepast. Grotere diameters dan 25 mm werden nauwelijks toegepast, mede door het moeilijke buigproces van de staven. Na 2002 is de wapening in dilatatievoegen van nieuw te bouwen tunnels verzwaard.

Bij vroegere ontwerpen werd de waterafdichting gerealiseerd door een rubberen voegstrook in combinatie met een waterdichte bekleding. Hedendaags wordt de waterafdichting verkregen door waterdichte bekleding en een rubbermetalen afdichtingsprofiel/voegstrook (W9U of W9Ui) welke wordt ingestort in het beton, zie Figuur 13. De aanhechting met het beton wordt verkregen door het staal. Het rubber moet bewegingen van de voeg toestaan. De kwaliteit van de waterafdichting hangt voornamelijk af van de kwaliteit van het afdichtingsprofiel zelf, maar ook uitvoeringstechnische aspecten spelen een rol. Men kan hierbij denken aan onder andere maattoleranties, correctheid van de aan te brengen wapening en het correct schoonmaken van de bekisting voorafgaande aan de betonstort. Een voegprofiel moet voorkomen dat vuil in de voeg komt. In bijlage 2 is de voeg op verschillende plaatsen in de doorsnede te zien. De rubbermetalen voegstrook zit altijd in de buitenste kraag. In vroegere ontwerpen werd het profiel in een V-vorm in de segmenten gestort (Figuur 14). Het voordeel hiervan is dat (een grote mate van) luchtinsluiting wordt voorkomen. Een dergelijke configuratie is te zien bij de ontwerpen van bijvoorbeeld de Kiltunnel, de Vlaketunnel en de Botlektunnel. Hedendaags wordt het waterafdichtingsprofiel in een rechte lijn in de voeg gestort. Dit is wapeningspraktisch gezien een betere oplossing.



Figuur 13: Dilatatievoeg in de vorm van kraagconstructie [11]



Figuur 14: Typische wapeningsconfiguratie van de kraagconstructie in een tunnelvloer

3 Zettingen

3.1 Oorzaken

Verschillende processen en aspecten kunnen van invloed zijn op de kans tot zetten van een tunnelelement. De oorzaken vinden hun oorsprong in zowel het bouw- en uitvoeringsproces als in de gebruiksfase van een tunnel.

Tijdens het plaatsen van de tunnelementen kan siltatie (aanslibbing) op de fundering een probleem zijn. Hierdoor kan een tunnelelement een ongewenst alignement krijgen. Slib kan ook het negatieve drijfvermogen van een element neutraliseren met als mogelijk gevolg het opdrijven van het element. Door een te ver van tevoren of een slecht gescrede² bedding kunnen hierin gaten ontstaan, onder andere door waterstroming. Dit resulteert in een lokaal verzwakte bedding.

Er zijn verschillende soorten fundering voor een afgezonken tunnel, elk met eigen karakteristieke kenmerken. Een grindbedfundering heeft strikte eisen met betrekking tot het screeden van de bedding. Als de tunnelementen eenmaal zijn geplaatst, kunnen er geen wijzigingen aangebracht worden in de bedding lay-out. Ook bij toepassing van een zandfundering kunnen incorrectheden in de uitvoering leiden tot stijfheidsverschillen in de bedding. Bij toepassing van een zandfundering kunnen de tunnelementen zowel horizontaal als verticaal worden nagesteld. Het behoeft geen verdere uitleg dat ook de beddingstijfheden van een zand- en grindfundering verschillen. De stijfheid van de bedding tezamen met die van de dieper gelegen grondlagen speelt een belangrijke rol in het zettingsproces van een tunnel.

Tijdens de verschillende te onderscheiden fasen in het gebruik van een tunnel kan een variërende oplegdruk een oorzaak zijn van zettingen. De oplegdruk wordt bepaald door onder andere de condities van de ondergrond, het gewicht van de tunnel en de belasting op de tunnel (gronddekking, waterstand, verkeer etc.). Bij de bouw van afgezonken tunnels wordt door het graven van een zinksleuf de ondergrond tijdelijk ontlast. Na het plaatsen van de zinkelementen en het aanvullen van de zinksleuf wordt de grond weer belast. Het gewicht van de tunnel plus aanvulling is vaak lager dan het gewicht van de voorheen aanwezige grond. Gevolg is dat de ondergrond een gedeeltelijk permanente ontlasting ondergaat. Wanneer de oplegdruk lager is, blijft de samendrukking van dieper gelegen grondlagen beperkt tijdens de bouw. Echter, door belastingtoename (toenemende verkeersintensiteit, zwaardere voertuigen en toenemende laadcapaciteit) is het mogelijk dat deze lagen tezamen met het vaak relatief losgepakte³ onderspoelzand onder de tunnelementen een verdichting ondergaan. Ook een permanente of tijdelijke verandering van het waterpeil in een waterweg boven een tunnel heeft

² Screeden is de Engelse term voor het schoon en vlak maken van de bedding, voorafgaande aan het afzinken van het tunnelelement.

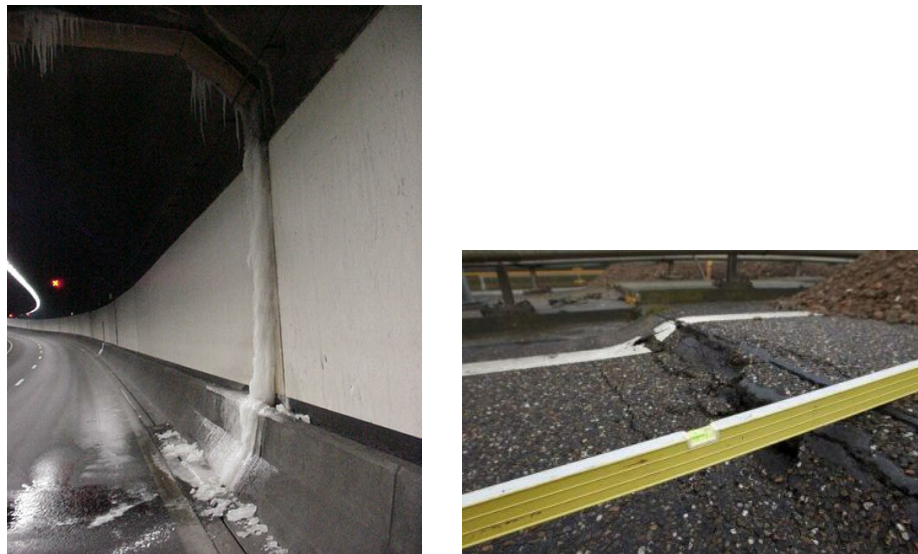
³ Bij een gebruikelijke laagdikte van het onderspoelzand van 1 m zand en een uit literatuur bekende verdichting van 4 tot 8% zouden zettingen ontstaan van 4 tot 8 cm [30]. Echter, in de praktijk worden dergelijk hoge zettingen niet vaak waargenomen. Waarschijnlijk komt dit doordat een deel van de zettingen in de periode direct na afzinken plaatsvindt, voordat een eerste coördinaatmeting is verricht.

belastingverandering tot gevolg. Een permanente wijziging treedt op door bijvoorbeeld het terugleggen van een dijk. Een tijdelijke verandering kan ontstaan door bijvoorbeeld het opstuwen van water wanneer schepen passeren of de aanwezigheid van getijdewerking. Ook de geometrie van de tunnel is mede bepalend voor de oplegdruk op de fundering (bodemdruk). Bij naar beneden taps afnemende tunneldoorsneden is de funderingsdruk algemeen gezien groter dan bij rechte tunneldoorsneden gezien de belastingen bij eerstgenoemde zijn geconcentreerd op een kleiner oppervlak.

3.2 Gevolgen

Zetting gerelateerde vervormingen van tunnels beïnvloeden zowel gebruikscondities als uiterste grenstoestand condities. Dit leidt mogelijk tot een (tijdelijke) buitengebruikstelling van een tunnel en verkorting van de levensduur.

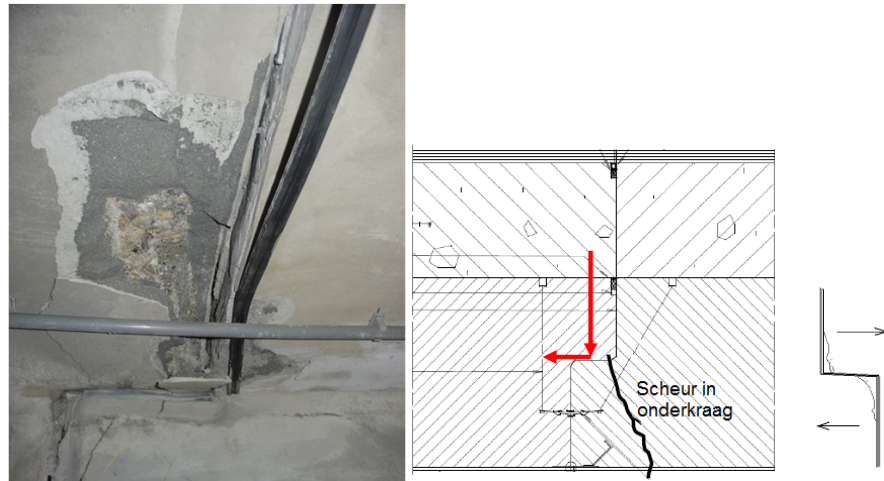
Verschilzettingen kunnen indirect leiden tot ongewenste gebruikscondities van en gevaarlijke situaties in tunnels. Door het openen van voegen kunnen water, zand en andere substanties indringen in de constructie. In wintermaanden kan lekwater leiden tot de vorming van ijs op het wegdek. Dit brengt mogelijk gevaarlijke situaties met zich mee voor het tunnelverkeer, zie Figuur 15. Een verschilzetting kan ook ongewenste knikken in het verticale alignement veroorzaken, zowel in het tunneldeel als bij toeritten. Bij de Vlaketunnel ontstond een dergelijk probleem door te grote opwaartse druk. Als gevolg brak de verbinding tussen de funderingspalen en het trog-segment van de toerit waardoor het wegdek omhoog kwam.



Figuur 15: Links: bevroren lekwater in de Drechtunnel [36]. Rechts: omhooggekomen wegdek bij een toerit van de Vlaketunnel [32]

Het optreden van te grote verschilzettingen en -rotaties tussen twee segmenten kan leiden tot schade aan de kraagconstructie. In Figuur 16 zijn mogelijke schadegevallen weergegeven. De belasting op de tandconstructie kan zo groot worden dat scheurvorming het gevolg is. Mogelijk dringt (zout) water in het beton,

met corrosieproblemen als gevolg. De duurzaamheid en daarmee de levensduur van de tunnel worden hierdoor beïnvloed. Door voegrotaties kunnen tevens de randen van de voegen onder druk komen te staan. Wanneer de opgewekte randspanningen te groot worden, kan het beton afboeren. Door horizontale bewegingen zoals het krimpen van segmenten, kan ter plaatse van het oplegvlak van de tandconstructie een schuifkracht ontstaan waardoor het ongewapende betondeel (de dekking) van de tand kan afbrokkelen.



Figuur 16: Links: afgeboerd beton in dak. Midden: gescheurde tand [8]. Rechts: afbrokkelen van het ongewapende betondeel.

3.3 Zettingsmetingen

3.3.1 Introductie

Vervormingsmetingen worden uitgevoerd met als doel de ligging van een kunstwerk te bepalen. Bij afgezonken tunnels zijn metingen verricht voor zowel de afgezonken tunneldelen als voor de toe- en uitritten. Per meting wordt voor ieder meetpunt, welke bestaat uit aan de wanden aangebrachte reflectors, de coördinaatligging bepaald. De volgende metingen zijn te onderscheiden: horizontale verplaatsingen (x- en y-coördinaat), verticale verplaatsingen (z-coördinaat), voegafstanden en tegenoverliggende wandafstanden. Het onderhavige onderzoek richt zich op verticale verplaatsingen.

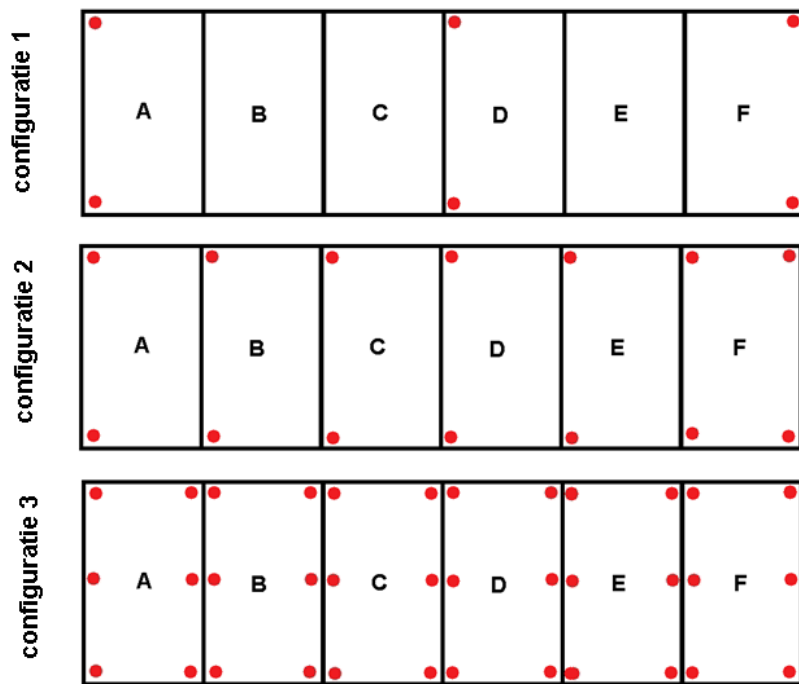
Al tijdens het afzinkproces en de afbouwfase worden metingen verricht om een juiste positionering van de tunnelementen te garanderen. In de gebruiksfase worden metingen uitgevoerd met als doel om een goed beeld te krijgen van de ligging van de tunnels als 'kettinglijn' (zoals in het ontwerp bedoeld). De metingen weerspiegelen relatieve vervormingen. Dit betekent dat alleen een representatie van de relatieve vervormingen van de constructie verkregen wordt. Er kunnen geen conclusies worden getrokken met betrekking tot de werkelijke vervormingen van de constructie ten opzichte van de omgeving. De omgeving (bijvoorbeeld een omliggend stuk land) kan ook vervormingen ondergaan, echter deze worden niet gemeten. Alle meetdata is herleid tot één deformatiepunt dat het meest stabiel is gebleken over de totale periode waarin metingen zijn verricht.

Om een goede afweging te kunnen maken welke tunnels geschikt zijn voor analyse is het volgende schema opgesteld, zie bijlage C. In het schema staan kenmerken van de verrichte metingen per tunnel (zowel afgezonken-, geboorde-, open bouwkuip- en landtunnels). Het blijkt dat de metingen per tunnel zeer verschillend kunnen zijn. De criteria uit het overzicht en andere van belang zijnde aspecten worden waar nodig hiernavolgend nader toegelicht.

3.3.2 *Hoeveelheid en ligging meetpunten*

Om de optredende vervormingen van de tunnelementen te kunnen analyseren is de ligging van de meetpunten van uiterst belang. Ook het aantal meetpunten speelt een belangrijke rol. In de tabel staat het aantal meetpunten per tunnel aangegeven. Echter, van groter belang is het aantal meetpunten per segment. Eén en ander wordt verduidelijkt aan de hand van een fictief tunnelement opgebouwd uit zes segmenten A t/m F (zie Figuur 17 voor een bovenaanzicht). In de figuur zijn drie verschillende configuraties van meetpunten aangegeven. De meetpunten zijn aangegeven met rode bolletjes.

- *Configuratie 1:* hierbij zijn in een aantal segmenten geen meetpunten aanwezig. Er kunnen geen zettingsanalyses worden gedaan voor de segmenten apart waardoor een dergelijk geval afvalt voor gedetailleerde analyse. De Heinenoordtunnel heeft een dergelijke configuratie.
- *Configuratie 2:* hierbij zijn per segment minimaal twee meetpunten aanwezig. Zettingsanalyses kunnen (onder behoud van aannamen) per segment worden uitgevoerd. Er kan echter een minder gedetailleerde analyse worden uitgevoerd met betrekking tot de vervorming van een individueel segment. Een dergelijke configuratie is te vinden in de Kiltunnel.
- *Configuratie 3:* hierbij zijn er zes meetpunten aanwezig per segment. Zettingsanalyses per segment en per element kunnen worden uitgevoerd. Doordat er meetpunten in de hoeken van beide aangrenzende segmenten aanwezig zijn, kan de verticale verschilverplaatsing tussen segmenten worden geanalyseerd. Door de aanwezigheid van drie meetpunten in dwarsrichting, kan de vervorming van individuele segmenten ook worden geanalyseerd. De Vlaketunnel heeft een dergelijke configuratie van meetpunten.



Figuur 17: Verschillende ligging van meetpunten in een fictief tunnelelement bestaande uit zes segmenten

3.3.3 *Tijdstip van nulmeting*

Behalve de plaats in de tunnel waar de metingen worden verricht, is ook het tijdstip van de metingen van belang. De eerst verrichte meting na plaatsing van de meetpunten/meetreflectoren wordt de nulmeting genoemd. De nulmeting geldt als referentiemeting voor alle herhalingsmetingen. Expliciet wordt dus de aanname gedaan dat de nulmeting overeenkomt met de onvervormde toestand en ligging van de constructie. Echter, vervormingen kunnen reeds zijn opgetreden in de periode voor de nulmeting (i.e. de bouwfase⁴). In een analyse zal dus in feite de vervorming van de constructie pas vanaf het tijdstip van de nulmeting worden beschouwd. Bij een langere periode tussen het bouwjaar en de nulmeting van een tunnel zijn de zettingswaarden dus minder waarheidsgetrouw met betrekking tot de werkelijke vervorming.

3.3.4 *Deformatiedrempels*

Informatie, richtlijnen en eisen omtrent de vervormingsmetingen zijn te vinden in het door Rijkswaterstaat gehanteerde document “Productspecificatie Deformatiemeting Kunstwerken”. In het document worden deformatiedrempels beschreven welke een maat zijn voor het aantonen van deformatie. Er wordt aangenomen dat er sprake is

⁴ Tijdens de bouw van iedere tunnel worden metingen verricht. In principe zou dus te achterhalen moeten zijn hoe de zettingen zich ontwikkelen vanaf het afzinken. Echter, deze gegevens zijn vaak niet of moeilijk te achterhalen uit de al dan niet beschikbare archieven. In het onderhavige onderzoek zijn de betreffende gegevens vanuit de bouwphase niet meegenomen.

van deformatie als het coördinaatverschil tussen de nulmeting en een herhalingsmeting groter is dan de gehanteerde waarde van de deformatiedrempel. De gebruikelijke drempelwaarden zijn 10 mm voor de horizontale vervormingen (x- en y-richting) en 5 mm voor de verticale vervorming (z-richting). De in de praktijk gehanteerde drempelwaarden kunnen verschillen van de gebruikelijke waarden. Reden hiervoor is bijvoorbeeld dat de ligging van een meetpunt niet accuraat genoeg kan worden bepaald. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een lange netwerk constructie. Een overschrijding van een drempelwaarde betekent dat met 80% zekerheid een significante vervorming is opgetreden. Echter, dit hoeft niet te betekenen dat de deformatie onacceptabel is voor de constructie. Of dit het geval is of niet moet dan worden onderzocht.

3.3.5 Aantal metingsherhalingen

Het aantal herhalingsmetingen is van belang voor de betrouwbaarheid van de resultaten en de ontdekking van mogelijke trends die zich door de jaren hebben ontwikkeld. Bij de beschikbaarheid van meer herhalingsmetingen neemt de betrouwbaarheid van analyses toe en kunnen afwijkingen en trends sneller worden herkend.

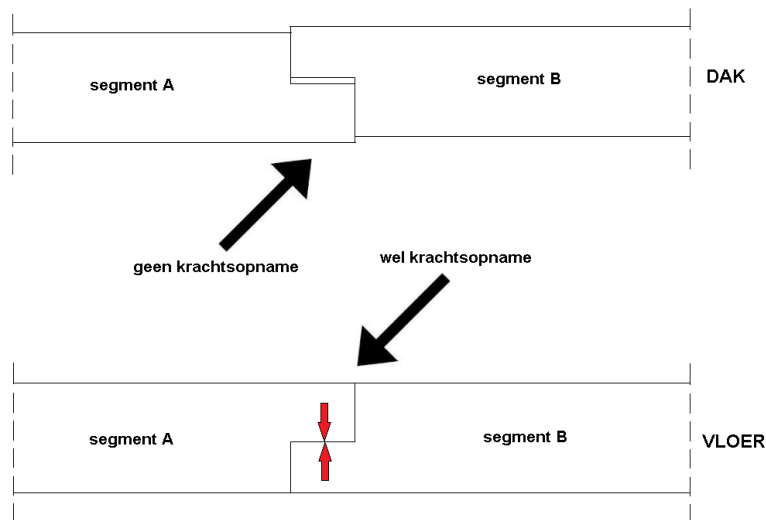
3.4 Zettingsmechanismen

Door de zettingsverschillen die meetpunten ondergaan ten opzichte van elkaar kunnen verscheidene vervormingsmechanismen in een tunnel optreden. In de volgende paragrafen worden deze besproken. De beschouwde mechanismen hangen af van de meetpuntconfiguratie.

3.4.1 Verschilzetting

Verschilzettingen kunnen zowel binnen een segment als tussen twee segmenten optreden. Wanneer twee meetpunten binnen een segment een ongelijke zetting ondergaan is, afhankelijk van de meetpuntligging, een segmentrotatie om de x- of y-as het gevolg. Indien drie of meer meetpunten binnen een segment een verschilzetting ondergaan is er sprake van buiging of torsie in het segment.

Wanneer twee opeenvolgende segmenten een verschilzetting ondergaan, resulteert dit in verhinderde vervorming. De kracht die deze verhinderde vervorming tot gevolg heeft, moet (afhankelijk van de richting van de zettingen) worden opgenomen door de kraagconstructie in dak of vloer. Dit is te zien in Figuur 18.

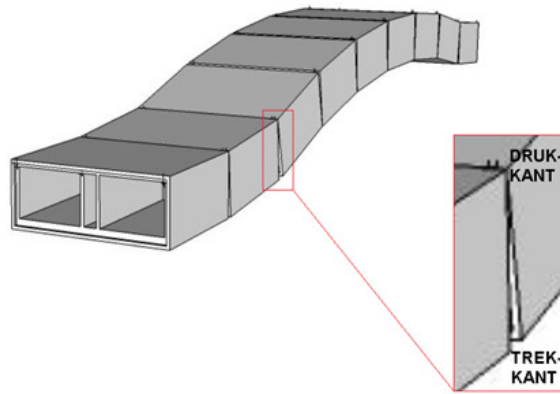


Figuur 18: Verhinderen van verticale vervorming bij zakkings van segment A t.o.v. segment B

Het coördinaatverschil bij de n^e herhalingsmeting is $\Delta Z = Z_{n^e\text{-herhalingsmeting}} - Z_{nulmeting}$. Een positieve zetting is gedefinieerd als $\delta = -\Delta Z$. Als de uitkomst van het coördinaatverschil negatief is betekent dit dus een positieve zetting van het meetpunt. Het betreffende meetpunt is dan lager komen te liggen.

3.4.2 Voegrotatie

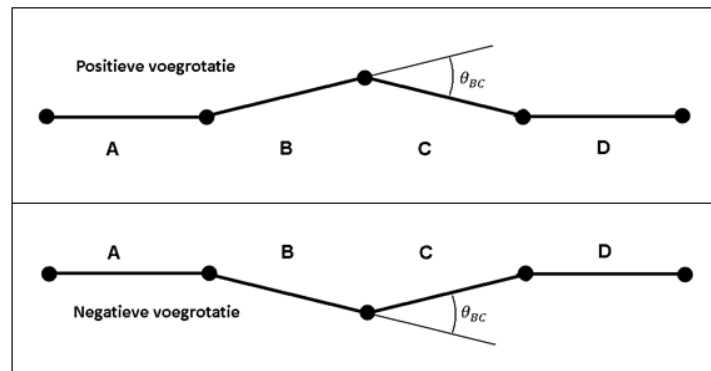
De rotatie van een segment wordt bepaald door de verschilzetting die het segment ondergaat tussen beide uiteinden in x- of y-richting. Verschilrotaties kunnen optreden op verschillende manieren. Wanneer verschilrotatie binnen een segment optreedt leidt dit tot buiging en/of torsie binnen het segment. Verschilrotatie kan ook optreden tussen twee opeenvolgende segmenten. Bij verschilrotatie om de dwars-as (de x-as) treedt een voegrotatie op. De voegrotatie wordt verkregen door superpositie van de rotaties van beide segmenten. Bij de voegen is een druk- en trekkant te onderscheiden. Dit is verduidelijkt in Figuur 19. De trekkant is fictief aangezien de segmentverbinding niet in staat is trekkrachten over te brengen. Dit vanwege het ontbreken van een constructieve verbinding. Bij een negatieve voegrotatie komt de kraagconstructie in het dak onder druk te staan. Verschilrotatie om de langs-as (de y-as) leidt tot torsie van de segmentvoeg in het xz-vlak.



Figuur 19: Rotatie van de segmenten om de dwars-as

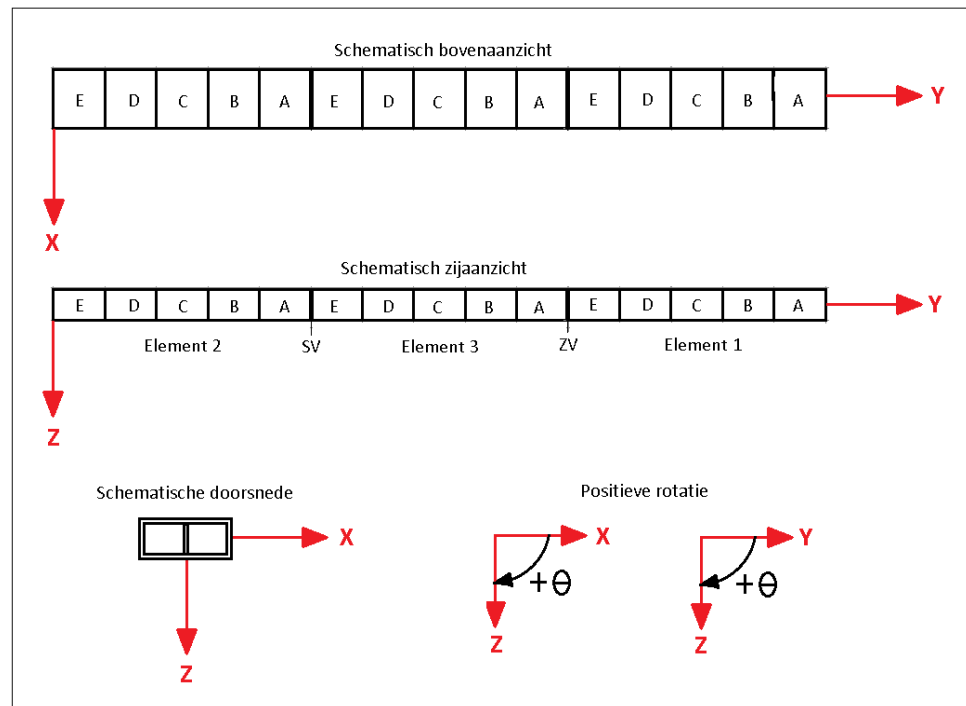
3.4.3 Schematisering constructie en tekenafspraken

Om zettingen en (voeg)rotaties in kaart te brengen wordt een tunnelement geschematiseerd als een ketting van starre staven welke onderling zuiver scharnierend met elkaar zijn verbonden. In Figuur 20 wordt dit 1D staaftmodel toegelicht aan de hand van een fictief tunnelement bestaande uit 4 segmenten A t/m D. In de figuur is ook te zien wat onder een positieve dan wel negatieve voegrotatie wordt verstaan. De segmenten zijn weergegeven als lijnen. De bolletjes tussen de lijnen representeren de segmentvoegen. In de figuur heeft de segmentvoeg tussen segmenten B en C een zetting ondergaan. Deze zetting resulteert in de volgende rotaties van de segmentvoegen: θ_{AB} , θ_{BC} en θ_{CD} . Rotaties θ_{AB} en θ_{CD} zijn de rotaties van segment B respectievelijk C en tegelijkertijd van voeg AB respectievelijk CD aangezien segmenten A en D niet roteren.



Figuur 20: Tunnelement als staaftmodel

De in het onderhavige onderzoek gebruikte assenstelsels en tekenafspraken zijn gedefinieerd in Figuur 21. De x-as komt overeen met de dwars-as van de tunnel. De y-as komt overeen met de langs-as van de tunnel. Op de z-as worden zettingen uitgezet.



Figuur 21: Definitie assenstelsels

4 Casestudy: Kiltunnel

4.1 Inleiding

4.1.1 Keuze

De Kiltunnel is uitgekozen als casestudy om een aantal redenen. Allereerst heeft er een bruikbare nulmeting plaatsgevonden. Daarnaast zijn veel herhalingsmetingen uitgevoerd en er zijn relatief veel meetpunten aanwezig. Dit aantal meetpunten met de daarbij behorende ligging is voldoende voor een gedetailleerde analyse. Naast deze van belang zijnde aspecten vanuit de meetkant zijn er lekkages en schadegevallen bekend.

De nulmeting van de zettingen dateert uit juli 1977. Na de nulmeting zijn er 20 herhalingsmetingen verricht: 4 metingen tussen september 1977 en april 1978 (aangeduid als de oude metingen) en 16 metingen tussen juli 2001 en augustus 2010 (aangeduid als de nieuwe metingen).

Voor de ligging van de meetpunten wordt verwezen naar bijlage D. De meetpunten liggen iets uit de hoeken van de segmenten (zoals configuratie 2 in Figuur 17). Voor de analyse zijn de opgetreden zettingen aangebracht in de voegen van de tunnel aangezien rotaties zich hier manifesteren. De meetpunten zijn dus iets verschoven ten opzichte van de werkelijke ligging. Van een aantal meetpunten is bij sommige herhalingsmetingen geen data beschikbaar.

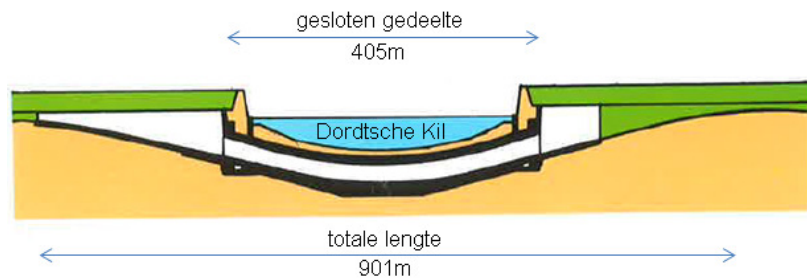
4.1.2 Tunnelbeschrijving

De Kiltunnel gaat onder de rivier de Dordtsche Kil door en verbindt daarmee de N217 vanuit 's-Gravendeel met de N3 richting Dordrecht. Verdieping en verbreding van de Kil werd gecombineerd met de bouw van de tunnel. De huidige vaargeulbreedte bedraagt 150 m. De nieuwe dijken van de Kil passeren deels de landhoofden. In 1977 werd de toltunnel in gebruik genomen. De huidige onderhoudsdiepte van de Dordtsche Kil is gelijk aan de nautische diepte en is gelegen op -9,4 m NAP. De bovenzijde van de Kiltunnel bevindt zich op -10,44 m NAP. Ter plaatse van de sluitvoeg is de vaargeuldiepte plaatselijk op -9,84 m NAP gelegen.

De tunnel heeft inclusief toeritten een totale lengte van 901 m. Een schematisch lengteprofiel van de tunnel is gegeven in Figuur 22. Het gesloten gedeelte is ongeveer 405 m lang en bestaat uit een ondergronds deel en een afgezonken deel. Het ondergrondse deel beslaat ongeveer 35 m aan beide kanten van de tunnel. Het afgezonken gedeelte is ongeveer 335 m lang en bestaat uit drie tunnelementen, elk vijf segmenten, welke gebouwd zijn in een bouwdok te Barendrecht. De afdekking op de tunnel bestond oorspronkelijk uit een 2 m dikke granulaatlaag. Om een vaargeulverdieping te kunnen realiseren is dit teruggebracht naar 1 m laagdikte.

De elementen bestaan uit twee verkeerskokers. Elke koker heeft twee rijbanen voor snel verkeer één voor langzaam verkeer en voetgangers. De 6 rijbanen van de buitenste twee elementen liggen onder een helling van 4,5%. Het middelste

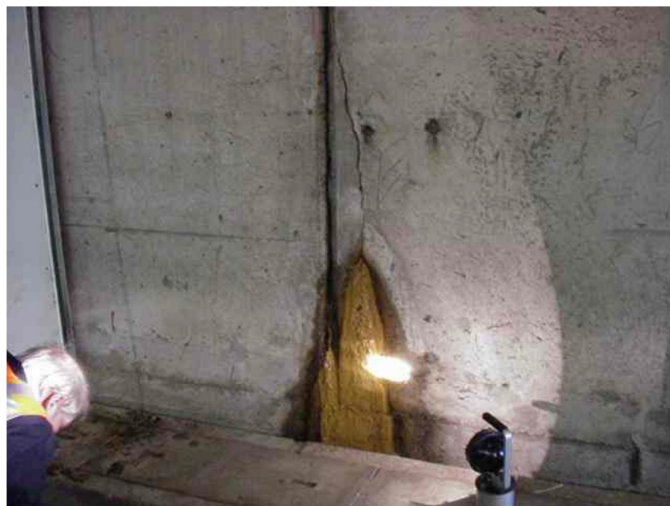
element ligt horizontaal. De tunnelvloer met daarop ballastbeton is ca. 2 m dik. Voor meer informatie met betrekking tot de tunneldoorsnede wordt verwezen naar bijlage E.



Figuur 22: Lengteprofiel van de Kiltunnel

4.1.3 Waargenomen schade

In 2001 werd een (groot) lek geconstateerd in dilatatievoeg 2CD ter plaatse van de buitenwand aan de zuidkant van de tunnel. Dit lek is hoogstwaarschijnlijk ontstaan door breuk van de kraagconstructie in de segmentvoeg. Uit onderzoek van RWS bleek zetting van de segmenten de oorzaak te zijn. De wapening van de vertanding was niet berekend op krachten als gevolg van dergelijk grote zettingen. Ook zou er sprake zijn van piping onder de tunnelvloer met zandverlies en daardoor zettingen als gevolg. De scheuren zijn door middel van injectie gevuld. De problemen waren aanleiding voor het hervatten van de zettingsmetingen met een frequentie van om de 3 a 4 maanden. Hedendaags worden de metingen jaarlijks verricht omdat na de problemen geen significante zettingsverschillen meer werden waargenomen.



Figuur 23: Scheur in voeg 2CD buitenkant zuidbuis [9]

4.2 Zetting

4.2.1 *Opgetreden zettingen*

De ligging van de z-coördinaat tijdens de verrichte metingen is te zien in bijlage F. Het zettingsgedrag van de tunnel is weergegeven in Figuur 24 voor de noordkant en Figuur 25 voor de zuidkant van de tunnel. De horizontale as geeft de lengte-coördinaat (y-as) van de tunnel weer; de verticale as de zettingen. Iedere lijn in de grafiek geeft de zetting op een bepaald tijdstip van meting weer, zie de legenda rechts in de grafieken. Onderin de grafieken is de ligging van de elementen weergegeven. Voor een meer gedetailleerd overzicht met betrekking tot de zettingen per element wordt verwezen naar bijlage G.

Oude metingen (sep '77 – apr '78)

Bij de oude metingen nemen de zettingslijnen in de tijd verschillende vormen aan. Bij noord en zuid zijn in september en oktober '77 geen zettingen van significante betekenis waar te nemen. Elementen 3 en 2 ondergaan zelfs plaatselijk een negatieve zetting (opwaarts). De zettingslijnen van de buitenste twee elementen in december '77 en april '78 vertonen een niet-lineaire toename waarbij zettingen tot 3 à 4 keer de waarden van voorgaande metingen worden gevonden. Element 3 vertoont een vrijwel lineaire toename in de tijd en de zettingstoename ten opzichte van de buitenste elementen is klein. Een mogelijke verklaring voor de snellere zettingstoename van de elementen 2 en 1 is de hogere bovenbelasting (de dijken lopen deels boven elementen 2 en 1).

Nieuwe metingen (aug '01 – aug '10)

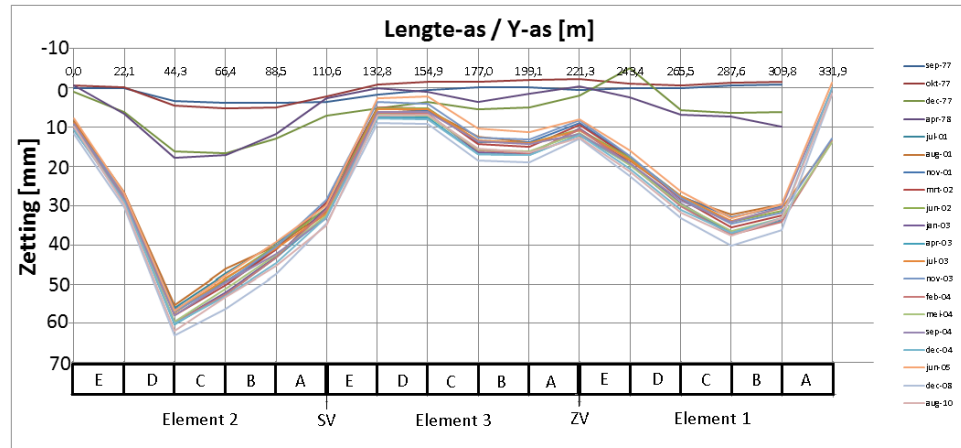
De zettingsgrafieken vertonen grote overeenkomsten in de tijd. De zettingslijnen nemen steeds dezelfde vorm aan. Bij zuid is ter plaatse van de zinkvoeg vanaf 2003 een sprong in de vorm van een toename in de zettingslijnen waar te nemen. Waarschijnlijk vindt deze afwijking zijn oorsprong in een meetfout door een herplaatsing⁵ van het meetpunt ter plaatse van de voeg en loopt de werkelijke zettingslijn conform die van eerdere nieuwe metingen. Deze verklaring wordt bekrachtigd doordat er geen afwijkende zettingen waar te nemen zijn bij de zinkvoeg van tunneldeel noord.

De vormen van de zettingslijnen van de noord- en zuidkant komen grotendeels met elkaar overeen. De grootte van de zettingen in bepaalde voegen neemt verschillen aan tot 10 mm. Opmerkelijk is dat de zetting van voeg 1CB naar voeg 1BA toeneemt aan de zuidkant, maar afneemt aan de noordkant.

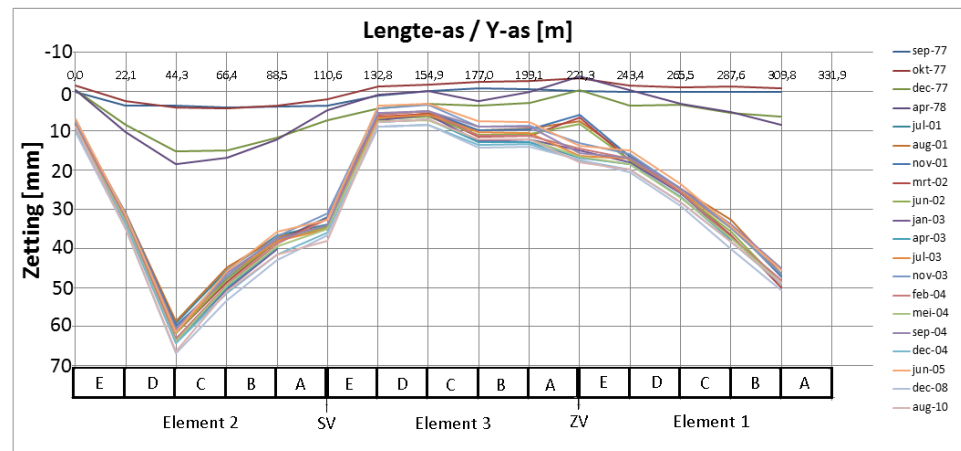
Er is geen data beschikbaar van meetpunt 42 (rechts in segment 1A zuid), waardoor de zettingslijn hier niet kan worden voortgezet. Waar wel data beschikbaar is, ziet men dat de zakking direct naast de landhoofden gering is (2E en 1A noord, 2E zuid). Het ontbrekende gedeelte van de zettingslijn van element 1 zuid zal er conform de verwachting een zelfde vorm hebben zoals bij element 2 zuid waar te nemen is.

⁵ De bout in het meetpunt ter plaatse van de zinkvoeg, evenals in een aantal andere voegen, is in 2003 opnieuw geplaatst. Bij de andere meetpunten werd ook een afwijking in de zettingslijn waargenomen, echter deze konden worden gecorrigeerd. Bij de zinkvoeg kon de afwijking niet worden gecorrigeerd wegens gebrek aan data.

De maximale zetting is 67 mm bij zuid en 63 mm bij noord, beiden gemeten in december 2008. Deze maxima zijn opgetreden in element 2, voeg DC (noord: meetpunt 11, zuid: meetpunt 12). Het middelste element ondergaat een meer gelijkmatige zetting over de lengte en ook de grootte van de zettingen blijft beperkt ten opzichte van de buitenste elementen.



Figuur 24: Zetting tunneldeel noordkant



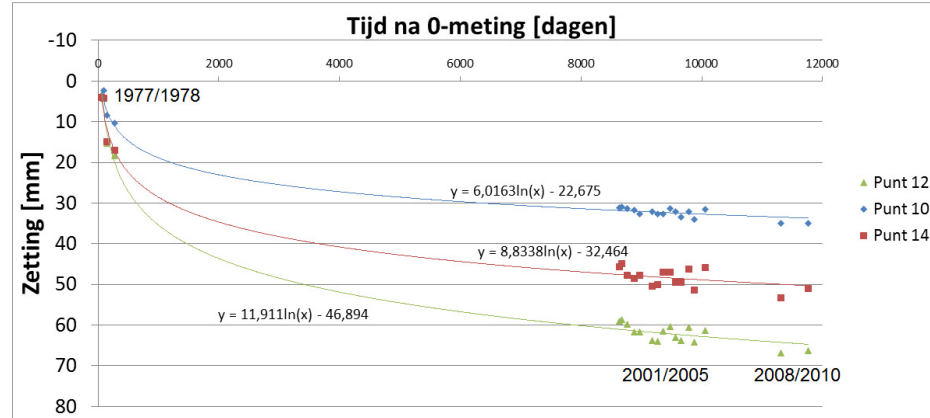
Figuur 25: Zetting tunneldeel zuidkant

4.2.2 Historische ontwikkeling

Bij grondmechanische berekeningen wordt vaak een maximale eindzetting aangenomen. Echter, de vergelijking van Koppejan laat een logaritmisch doorgaande zetting in de tijd zien. In de vergelijking van Koppejan wordt de totale zetting beschreven als functie van de primaire- en secundaire zetting. De primaire zetting wordt bereikt na volledige consolidatie. De secundaire zetting treedt op ten gevolge van kruip van het korrelskelet. Hieruit blijkt dat de zettingsontwikkeling goed is weer te geven met behulp van een logaritmische trendlijn. Deze is opgesteld op basis van de gemeten zettingen in de tijd. In Figuur 26 zijn historische

zettingswaarden uitgezet en is tevens de verwachte zettingsontwikkeling geplot als functie van het aantal dagen na nulmeting. Dit is voor de volgende drie meetpunten gedaan:

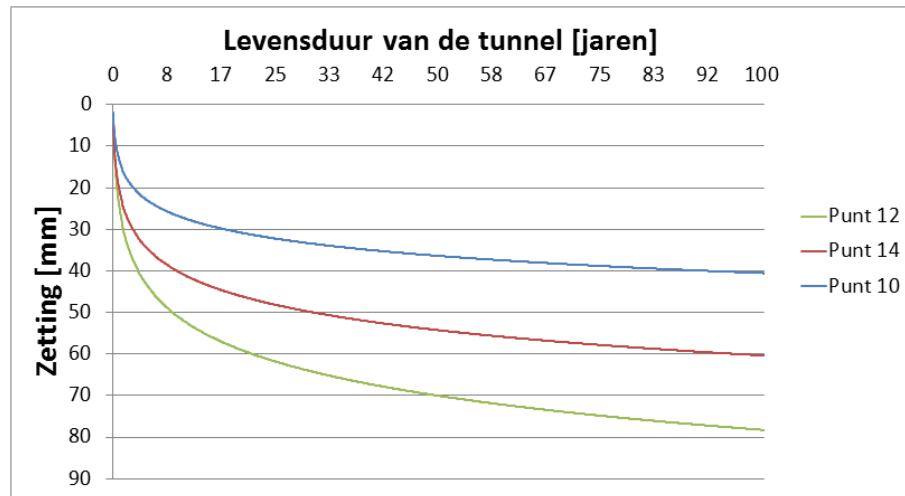
- Meetpunt 12 ter plaatse van voeg 2DC zuid. Dit meetpunt vertoont volgens de grafieken uit de vorige paragraaf de grootste zettingen.
- Meetpunt 10 ter plaatse van voeg 2ED zuid. Dit is het eerste meetpunt links van meetpunt 12.
- Meetpunt 14 ter plaatse van voeg 2CB zuid. Dit is het eerste meetpunt rechts van meetpunt 12.



Figuur 26: Historische zettingsontwikkeling van meetpunten 10, 12 en 14 (zuid)

4.2.3 Toekomstige verwachting

Door de ontwikkeling van de zetting door te zetten op basis van de gevonden zettingslijnen (zie vorige paragraaf), kan de verwachte toekomstige zetting worden berekend. In Figuur 27 is deze ontwikkeling tot een levensduur van de constructie van 100 jaar weergegeven. De zetting tijdens de laatste meting (aug 2010) bedraagt 66 mm. Volgens de grafiek loopt de zetting op tot 78 mm bij een levensduur van 100 jaar. Aan de hand van de grafiek lijkt de grootste zetting in de eerste jaren na bouw op te treden: na 3 jaar en 9 maanden is dit al ongeveer 50% van de totale zetting. Na 19 jaar en 5 maanden is ongeveer 75% van de totale zetting opgetreden. Nadat de grootste zettingen zijn opgetreden is de toename in de tijd steeds meer lineair van aard. In bijlage G zijn ook de grafieken van de zettingsontwikkeling voor meetpunten 9, 11 en 13 (noord) te vinden.

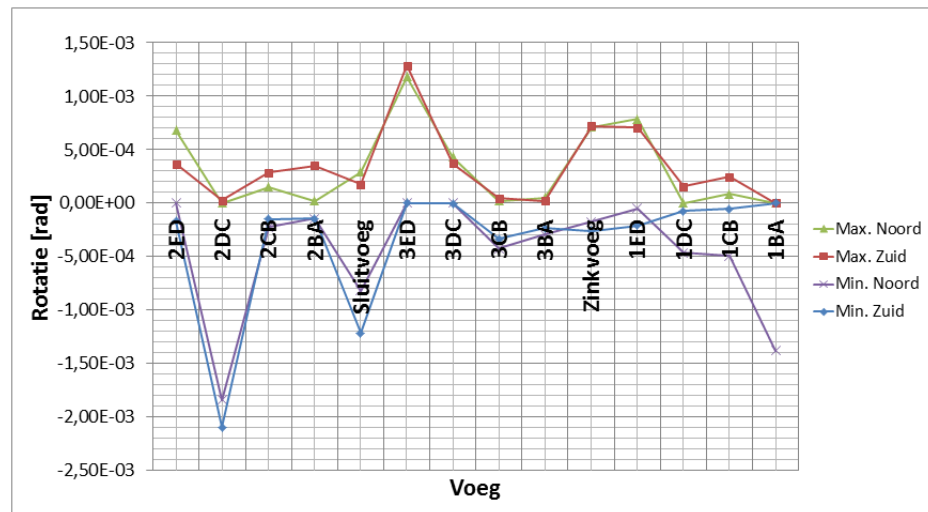


Figuur 27: Toekomstige zettingsontwikkeling van meetpunten 10, 12 en 14 (zuid)

4.3 Segmentvoegrotatie

4.3.1 Opgetreden extremen

In Figuur 28 is per voeg de extreem gemeten voegrotatie om de x-as geplott voor noord en zuid. Grafieken voor noord en zuid apart inclusief de corresponderende numerieke waarden zijn te vinden in bijlage H. Tevens vindt men in deze bijlage rotatiegrafieken van de segmentvoegen als functie van de tijd. De rotaties worden positief of negatief aangeduid. Het teken van de rotatie (+ of -) is van belang voor de weerstand van de voeg tegen de rotatie. Voor tekenafspraken wordt verwezen naar paragraaf 3.4.3. In Tabel 2 wordt per voeg weergegeven in welk jaar de extreme rotatie is gemeten.



Figuur 28: Extreem gemeten segmentvoegrotaties zuid en noord

Bij de nieuwe metingen is de extreme negatieve rotatie van voegen 2ED, 2CB en 2BA nihil, terwijl bij voeg 2DC hier juist de grootste waarde wordt gevonden. De rotatie van een segment is de eerste afgeleide van de verschilzettingen over dat element naar de lengte van het element. Daarom betekent het optreden van de extreme rotatie in voeg 2DC een knik in de zettingslijn van element 2. Bovenstaande is terug te zien in de zettingsgrafieken van element 2 waar bij de nieuwe metingen een driehoek te herkennen is met de punt naar beneden. De grootste positieve rotatie treedt op bij voeg 3ED. Als men in de betreffende zettingsgrafieken kijkt, ziet men weer een knik in de zettingslijn. De extreme negatieve voegrotaties van element 1 zuid zijn aanzienlijk lager dan die van noord. Dit komt doordat er meetdata ontbreken van meetpunten aan de zuidkant waardoor een volledig beeld daar ontbreekt.

	noord		zuid	
	min	max	min	max
2ED	sep '77	jan '03	sep '77	mrt '02
2DC	aug '10	sep '77	aug '10	sep '77
2CB	apr '78	aug '01	apr '78	aug '01
2BA	apr '78	jul '01	apr '78	jun '05
Sluitvoeg	jun '05	apr '78	aug '10	apr '78
3ED	dec '77	aug '10	dec '77	aug '10
3DC	okt '77	jan '03	okt '77	jan '03
3CB	jan '03	sep '77	jan '03	sep '77
3BA	jan '03	sep '77	feb '04	sep '77
Zinkvoeg	dec '77	dec '08	sep '04	mrt '02
1ED	okt '77	dec '77	dec '77	jul '03
1DC	dec '77	sep '77	apr '78	jan '03
1CB	jan '03	apr '78	dec '77	aug '01
1BA	dec '08	jul '03	n.a.	n.a.

Tabel 2: Jaar waarin extreme rotaties zijn opgetreden per voeg

4.3.2 Toekomstige rotatieverwachting

De zetting van punt 12 (voeg 2DC) neemt in verplaatsingswaarde sneller toe dan die van punten 10 en 14 (voeg 2ED respectievelijk 2CB). Dit betekent dat ook de grootte van de rotatiehoek verandert. Op basis van de te verwachten zettingen van de drie meetpunten, kan de bijbehorende rotatie van voeg 2DC worden berekend. Uit de uitgevoerde analyse blijkt dat de rotatie van de voeg toeneemt tot een maximum van $-2,529 \times 10^{-3}$ radialen bij een levensduur van de tunnel van 100 jaar. Dit is een toename van 21% ten opzichte van de grootste rotatie in de betreffende voeg tijdens de verrichte metingen.

4.4 Torsie

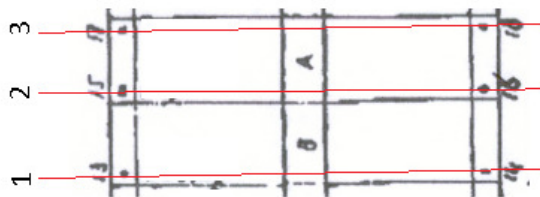
Bij segmenten 2A, 3A en 1A is ter plaatse van iedere voeg een meetpunt aanwezig. Rotatie van de segmenten om de langs-as wordt bepaald door het verschil in zetting tussen de noord- en zuidkant. Om een uitspraak te kunnen doen over mogelijk optredende torsie binnen de segmenten en de grootte daarvan, wordt de volgende aanpak gehanteerd waarbij segmenten 2B en 2A als voorbeeld worden genomen (Figuur 29 en bijlage I):

- Bereken V1 gedefinieerd als de verschilzetting tussen punten 14 en 13 en minus de verschilzetting tussen punten 16 en 15.
- Bereken V2 gedefinieerd als de verschilzetting tussen punten 16 en 15 minus de verschilzetting tussen punten 18 en 17.

Wanneer $V2=0$ treedt er geen torsie binnen het segment op. Wanneer $V2>0$ of $V2<0$ heeft de lijn door punten 16 en 15 een andere helling dan de lijn door punten 18 en 17 wat betekent dat er torsie optreedt in het xy-vlak van het segment. Om de significantie van de torsie ten opzichte van de verschilrotatie tussen aangrenzende

segmenten te kunnen bepalen wordt de waarde van V2 vergeleken met de waarde van V1.

Uit een analyse blijkt dat het verschil in rotatie binnen segment 2A van de 18 metingen waarvan data beschikbaar is, 17 keer hoger is dan het verschil in rotatie tussen segmenten 2A en 2B. De gemiddelde verhoging is 299%. Van de 19 metingen bij segmenten 3A en 3B is dit 11 keer hoger, 5 keer lager en 3 keer gelijk met een gemiddelde verhoging van 52%. Hieruit wordt geconcludeerd dat de segmentvoegen zich stijver gedragen dan de segmenten zelf met betrekking tot torsie. De rotatie manifesteert zich dus met name binnen de segmenten en niet in de voegen. Wegens gebrek aan data kunnen geen uitspraken worden gedaan betreffende element 1.

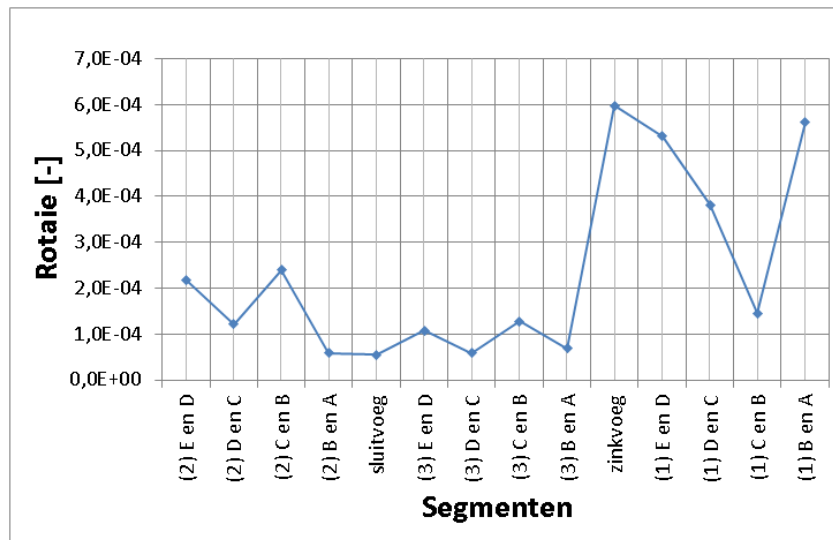


Figuur 29: Segmenten 2B en 2A met 3 denkbeeldige lijnen door de meetpunten

Aangezien het onderhavige onderzoek zich concentreert op de dilatatievoegen, wordt het extreme geval beschouwd, namelijk wanneer alle torsie zich in de voegen manifesteert. Torsie in de voegen wordt bepaald door de segmentvoegrotatie om de y-as. Bij de berekening van deze segmentvoegrotaties is er aangenomen dat de rotatie zich geheel manifesteert in de voeg. Met andere woorden: de segmenten gedragen zich volledig star in het xy-vlak. Gezien de conclusie uit de vorige paragraaf is deze aanname zeer conservatief.

In Figuur 30 zijn per voeg de extreem gemeten verschilrotaties tussen aangrenzende segmenten weergegeven. Een maximale verschilrotatie van segmenten wordt gevonden tussen segmenten 1B en 1A met een waarde van $5,6E-4$ radialen. Gaat men uit van een lineair verband tussen de rotatie en verplaatsing, dan betekent deze rotatie een opgelegde verplaatsing van ongeveer 9 mm in de hoekpunten van de segmenten⁶. Over de grootte van de torsiekrachten valt, net als de dwarskrachten in de voegen, niets te zeggen naar aanleiding van alleen de zettingslijnen.

⁶ De afstand tussen een hoekpunt en het rotatiecentrum van de doorsnede is ongeveer 16100 mm.



Figuur 30: Extreem gemeten rotaties (absolute waarden)

4.5 Vergelijking met andere tunnels

Om de representativiteit van het gevonden zettingsgedrag van de Kiltunnel te toetsen is een zettingsanalyse van de volgende tunnels uitgevoerd: de Heinenoord-, de Botlek- en de Vlaketunnel. Bij de Heinenoord- en Botlektunnel (beiden vijf zinkelementen) zijn slechts meetpunten ter plaatse van de zinkvoegen en in het midden van de elementen aangebracht waardoor geen uitspraken met betrekking tot de segmentvoegrotaties kunnen worden gedaan. Bij de Vlaketunnel (twee zinkelementen) zijn ter plaatse van alle zink- en segmentvoegen meetpunten aangebracht. Net als bij de Kiltunnel is de nulmeting bij de Botlektunnel in het jaar van opening verricht. Bij de Heinenoord- en Vlaketunnel was dit ongeveer twintig jaar na opening. Zie voor de vergelijkende informatie Tabel 3. De zettingslijnen van de betreffende tunnels zijn weergegeven in Figuur 31 t/m Figuur 33.

Tunnel	Opening	Nulmeting	Elementen / segmenten	Meetpunten
Heinenoord-tunnel	1969	1990	5 / 6	zinkvoegen, midden element
Vlaketunnel	1975	1994	2 / 6	alle voegen
Kiltunnel	1977	1977	3 / 5	alle voegen
Botlektunnel	1980	1980	4 / 6 1 / 5	zinkvoegen, midden element

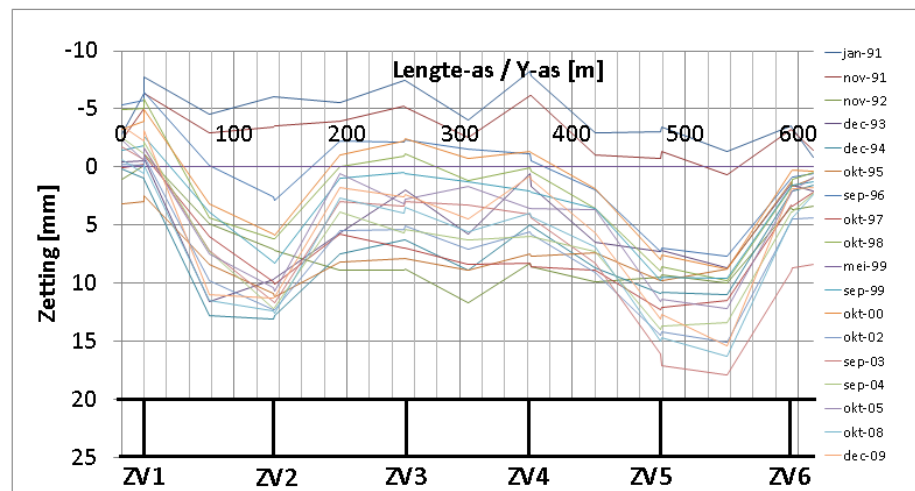
Tabel 3: Informatie tunnels

Eenzelfde soort zettingspatroon als bij de Kiltunnel is waar te nemen bij de Vlaketunnel. Bij het middelste gedeelte blijft de grootte van de zettingen beperkt ten opzichte van de gedeelten richting de landhoofden. Opvallend is wel dat de zettingslijn van element 1 een aanzienlijk flauwere helling heeft dan de zettingslijn

van element 2. De zetting blijft beperkt tot ongeveer 10 mm met een enkele uitschieter van 15 mm gemeten bij meetpunt 448. De maximale rotatie van de hier aanwezige segmentvoeg 2BA is $1,92E-4$ radialen. Dit is meer dan tien keer kleiner dan de maximum voegrotatie bij de Kiltunnel.

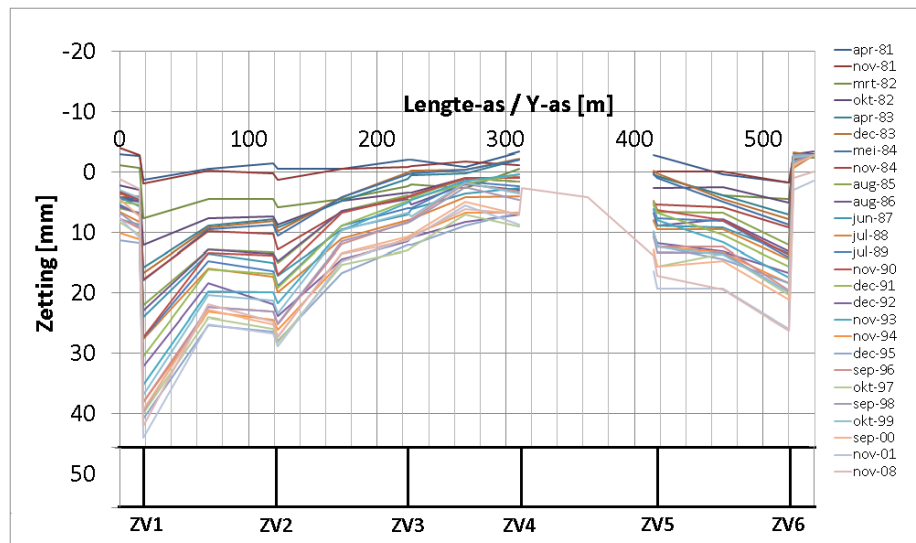
Ook bij de Heinenoord- en Botlektunnel is de zetting in het midden van de tunnel kleiner dan aan de buitenkanten. De zetting van de Heinenoordtunnel neemt net als bij de Vlakte- en Kiltunnel vanaf de landhoofden geleidelijk in waarde toe. Bij de Botlektunnel is echter een directe sprong van orde 30 mm (west, ZV1) en orde 20 mm (oost, ZV6) waar te nemen bij beide aansluitpunten op de landhoofden⁷. De zettingen zijn gemeten vanaf begin levensduur van de tunnel, echter qua grootte blijven ze orde twee keer zo klein als bij de Kiltunnel. Opvallend bij de grafiek van de Botlektunnel is dat de zetting tot aan de laatste meting geen duidelijke functionele toename vertoont. De zettingslijn die de grootste zettingen toont, dateert uit december 1995 (13 jaar voor de laatste meting uit 2008).

De aanzienlijke zettingsverschillen van de Vlakte- en Heinenoordtunnel met de Kiltunnel (en in mindere mate de Botlektunnel) zijn mogelijk te verklaren door het tijdstip van nulmeting. Het grootste gedeelte van de zettingen van de twee eerstgenoemde tunnels zijn hoogstwaarschijnlijk in de eerste jaren na bouw opgetreden. Van deze jaren is geen meetdata beschikbaar. Er zijn daarom geen betrouwbare uitspraken te doen met betrekking tot de grootte van de werkelijk opgetreden zettingen. Daarnaast ligt de Vlaketunnel in een getijdegebied. In [23] is aangetoond dat de tunnel meerdere keren per dag een verticale op en neer gaande beweging tot 15 mm ondergaat als gevolg van verschillende waterstanden in het kanaal boven de tunnel.

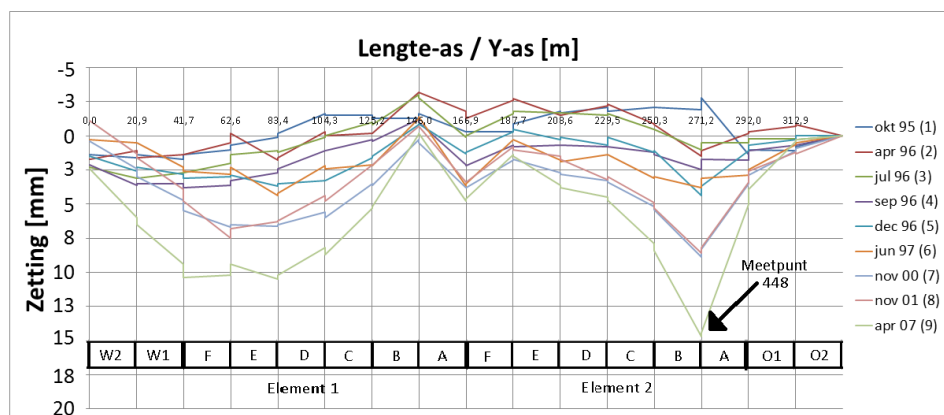


Figuur 31: Zetting Heinenoordtunnel

⁷ Volgens [2008-115/A] zijn tijdens het afzinken en ballasten in de bouwphase van de tunnel al zettingen van de aansluitpunten op de landhoofden gemeten van 150 mm (west) en 200 mm (oost). Deze zijn niet in de figuur weergegeven.



Figuur 32: Zetting zuidkant Botlektunnel



Figuur 33: Zetting zuidkant Vlaketunnel

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Kiltunnel

De tijdens het ontwerp van de tunnel veronderstelde kettinglijn heeft zich niet conform de verwachtingen ontwikkeld. Het middelste element (nr. 3) ondergaat minder zettingen dan de buitenste elementen (nr. 2 en 1). De buitenste elementen voldoen individueel wel aan de “kettinglijn-theorie”, maar de tunnel als geheel niet.

Uitgaande van een levensduur van 100 jaar is bij de Kiltunnel momenteel (± 34 jaar na de bouw) meer dan 80% van de verwachte eindzetting opgetreden. De zetting van de tunnel is een doorgaand (logaritmisch) afnemend proces waarbij 4 jaar na de bouw al $\pm 50\%$ van de totale zetting was opgetreden. Uit de zettingslijnen blijkt dat het grootste deel van de zettingen is opgetreden in de eerste jaren na de bouw van de tunnel.

Al in december 1977 is de deformatiedrempel met betrekking tot de verticale vervorming overschreden. Echter, pas in 2001 ontstonden functionaliteitsproblemen in de tunnel. Bij de nieuwe metingen is het overschrijden van de deformatiedrempel meer regel dan uitzondering. In de door RWS gehanteerde “Productspecificatie Deformatiemeting Kunstwerken” staat aangegeven dat een overschrijding van de deformatiedrempel niet hoeft te betekenen dat de deformatie ontoelaatbaar is voor de constructie. Aan de hand van de gevonden overschrijdingen (zelfs al bedragen deze meer dan 1000% van de drempelwaarde) zijn daarom geen conclusies te trekken met betrekking tot het functioneren van de tunnel. De verticale deformatiedrempel wordt daarom niet representatief geacht als maatstaf voor de werkelijk toelaatbare deformaties.

Met behulp van het zettingsverloop is een goed beeld verkregen van de optredende voegrotaties. De voegrotaties kunnen vertaald worden naar buigende momenten waarop de segmentvoeg wordt belast. De dwarskracht wordt opgewekt door de verticale verhinderde vervorming tussen de segmenten. De optredende krachten in de tunnelementen zijn zonder aanname met betrekking tot de stijfheid van de bedding⁸ niet te bepalen uit de zettings- en rotatieanalyses. Over de grootte van de optredende dwarskracht in de voegen kunnen daarom geen conclusies worden getrokken.

Voor wat betreft de kritieke gebieden in de segmentvoeg als gevolg van zettingen wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende delen van de kraagconstructie:

- *De vloer en het dak*: hier worden krachten ontwikkeld als gevolg van segmentvoegrotaties om de dwars-as van de segmenten.
- *De hoekpunten*: als gevolg van rotaties om de langs-as van de segmenten treden hier de grootste krachten op aangezien hier de afstand tot het rotatiecentrum het grootst is.

⁸ Beddingwaarden zijn vooralsnog onbekend.

5.2 Afgezonken tunnels algemeen

Op basis van de zettingslijnen van de vier beschouwde tunnels wordt het volgende geconcludeerd:

- De tijdens het ontwerp van tunnels veronderstelde kettinglijn ontwikkelt zich niet conform de verwachtingen. De kettinglijn ontwikkelt zich in tweevoud waarbij de kleinste zettingen optreden in het midden van de tunnel.
- De verticale deformatiedrempel is niet representatief als maatstaf voor de werkelijk toelaatbare deformaties.
- De op de voeg werkende krachten zijn niet uit het zettingsverloop af te leiden.
- De grootte van optredende zettingen in afgezonken tunnels is in aanzienlijke mate afhankelijk van lokale omstandigheden (tunnelontwerp, getijdegebied, dijkteruglegging).

5.3 Zettingsmetingen

Door gebrek aan meetpunten kunnen sommige tunnels niet optimaal worden geanalyseerd. Bij het aanbrengen van meetpunten (hoeveelheid en ligging) wordt aanbevolen rekening te houden met te verwachten vervormingsmechanismen die kunnen optreden in de constructie als gevolg van zettingen. Hierbij dient in gedachten te worden gehouden dat segmentvoegen in dit opzicht kritieke gebieden zijn.

Bij de Kiltunnel zijn in de periode tussen 1978 en 2001 geen metingen verricht. Het werkelijke zettingsverloop in deze periode is daarom niet bekend. De opgetreden schade was aanleiding om de metingen weer te hervatten in juli 2001. Door frequenter metingen te verrichten kunnen schadegevallen achteraf mogelijk wel worden gecorreleerd aan zettingslijnen. Ook kunnen mogelijke “probleemvoegen” eerder bekend zijn uit het zettingsverloop, waardoor tijdig maatregelen getroffen kunnen worden. Door de meetfrequentie te verhogen, kan ook een betrouwbaardere zettingsvoorspelling worden gedaan.

Doordat de nulmeting als referentie geldt voor verdere metingen, is het noodzaak dat de coördinaatligging direct na de bouw wordt bepaald en vastgelegd. Voor de volgende tunnels - in chronologische volgorde van bouwjaar - staat tussen haakjes het aantal jaren dat is verstreken tussen de opening en de nulmeting: Coentunnel (24), 1^e Beneluxtunnel (15), Heinenoordtunnel (21), Vlaketunnel (19), Zeeburgertunnel (2), Noordtunnel (1), 2^e Beneluxtunnel (6). Wegens de late nulmetingen kunnen de initiële zettingen niet in de analyse worden betrokken. Aanbevolen wordt om deformatiemetingen direct te starten na het afzinken van de elementen.

5.4 Optredende krachten

De optredende rotaties kunnen goed in kaart worden gebracht aan de hand van de zettingslijnen. De optredende krachten die de rotaties tot gevolg hebben volgen echter niet uit de zettingsanalyse.

Aangezien de landhoofden op palen zijn gefundeerd en daardoor minimale zetting ondergaan, is het mogelijk dat de segmenten direct naast de landhoofden door grondverdichting plaatselijk niet zijn ondersteund. Elementen 3 en 1 van de Kiltunnel liggen onder een helling. Het onderspoelzand is (door de relatief hoge porositeit) waarschijnlijk in de loop der jaren verdicht. Door de verdichting van het zand en onder de werking van de zwaartekracht zakt het zand. Meer naar beneden in de helling is het zand dan vaster gepakt. Meer naar boven ontstaan mogelijk holle ruimten in de fundering, waardoor plaatselijke afwezigheid van grondondersteuning niet is uit te sluiten. Dit zal de krachtswerking in de tunnel (op voornamelijk de kraagconstructie) beïnvloeden. Om een beter beeld te krijgen van de op een afgezonken tunnel werkende krachten wordt daarom aanbevolen onderzoek te verrichten naar het gedrag van de ondergrond, de interactie tussen de landhoofden en de elementen en de invloed daarvan op de krachtswerking in de elementen.

In de analysegrafieken zijn de voegen steeds geschematiseerd als dimensieloos in lengterichting. Voor de segmentvoegen wordt dit acceptabel verondersteld aangezien de segmenten direct beton-op-beton aansluiten. De zink- en sluitvoeg hebben een bepaalde breedte en daarom is het minder waarheidsgetrouw deze te schematiseren als dimensieloos in lengterichting. Om een beter inzicht te krijgen in de vervormingen ter plaatse van de zink- en sluitvoeg en de invloed hiervan op de totale zettingslijn van de tunnel wordt aanbevolen het gedrag van deze voegen onder de invloed van zettingen nader te onderzoeken.

6 Referenties

Boeken

- [1] Tunnels in the Netherlands, underground transport connections (1987). Kees Stikma.
- [2] *Immersed tunnel techniques 2* (1997). Proceedings of the international conference, held in York, Ireland. Edited by Charles Ford.
- [3] *Geboorde en afgezonken tunnels* (2000). J.K. Vrijling en K.J. Bakker. TU Delft, collegedictaat.
- [4] *Tunnels in the Netherlands, a new generation* (2003). J. van der Schot, Van der Schot Tekst & Theater, Amsterdam.
- [5] *(Re)claiming the Underground Space* (2003). Proceedings of the ITA world tunneling congress, Amsterdam, The Netherlands. Edited by J. Saveur.
- [6] *Specifieke Aspecten Tunnel Ontwerp (SATO)*. Bouwrichtlijnen infrastructuur. Rijkswaterstaat.
- [7] *Dilatatievoegstroken* (2007). Trelleborg Bakker BV.
- [8] *Bijzondere wapening* (2008), Stubeco studiecél B07.
- [9] *LEKKAGE in TUNNELS, Dilatatievoegen en beton* (2008). Ing. L. Leeuw. Rijkswaterstaat Bouwdienst.
- [10] Introduction to tunnel construction (2010). David Chapman.
- [11] DESIGN OF THE MEDWAY TUNNEL PROJECT

Artikels en conferenties

- [12] Immersed tunnel settlements, Part 1: nature of settlements (2001). Grantz W.C.
- [13] Immersed tunnel settlements, Part 2: case histories (2001). Grantz W.C.
- [14] *De Calandtunnel: voor de verandering een afzinktunnel* (2001). Ir. R. van Limbergen. Uit: Cement 2001 nr. 1.
- [15] *Afzinktunnels Dordtsche Kil en Oude Maas* (2003). Ir. W.M. 't Hart en ir. Ch.J.A. Hakkaart. Uit: Cement 2003, nr. 3.
- [16] *Settlements of HSL Immersed Tunnels*. H. Morties, W.M. 't Hart en Ch.J.A. Hakkaart.

- [17] Immersed Tunnels: Experiences and Recent Developments. Ir. Ch.J.A. Hakkaart
- [18] Masterplan 2011-2014 Tunnels, Concept Masterplan Tunnels (23-05-2011).

Afstudeeronderzoeken

- [19] ECONOMIE VAN HET BOUWEN VAN AFZINKTUNNELS (1987). J.W.A. Geel. TU Delft.
- [20] Dilatatievoegen in afzinktunnels (1996). P.A. Wenneker. TU Delft
- [21] *Afzinktunnel 't Groene Hart* (1999). N.Q. Nguyen. TU Delft.
- [22] Afzinkengineering van afzinktunnels (2000). S. Huitema. TU Delft.
- [23] *Onderzoek naar meetafwijkingen in tunnels* (2002). J. van den Berg, A. Riedijk. Hogeschool Utrecht.
- [24] CONSTRUCTIEF ONTWERP, TOEPASSING VAN DWARSVOORSPANNING, DIEPGELEGEN AFZINKTUNNELS (2002). B.J. Bader. TU Delft.
- [25] Interactiesysteem tussen betonnen tunnelementen en een grindfundering (2005). P.J.C. Vervoort. TU Delft.
- [26] PRELIMINARY DESIGN AND ANALYSIS FOR AN IMMERSED TUBE TUNNEL ACROSS THE İZMİR BAY (2008). Nisa Kartaltepe. İzmir Institute of Technology.
- [27] Behaviour of segment joints in immersed tunnels under seismic loading (2010). R. S. van Oorsouw. TU Delft.
- [28] *Dwarskracht in zinktunnels* (2011). D.A.W. Joosten. TU Delft.

Rapporten

- [29] *Nieuwe Botlekbrug, Analyse invloed op Botlektunnel en Botlekbrug* (2009). Projectcode: 2008-115/A. Gemeentewerken Rotterdam, Ingenieursbureau.
- [30] Vervormingen van afgezonken tunnels in *Nederland* (2011). Rapportnummer: TNO-060-DTM-2011-04316. TNO Bouw en Ondergrond.

Internet

- [31] InfraQuest, COMPETENCE CENTRE FOR ROADS AND STRUCTURES.
www.infraquest.nl

[32] Onderzoek naar schade Vlaketunnel uitgesteld, Metro. www.metronieuws.nl

[33] Pulau Seraya cable tunnel. Mott MacDonald. www.tunnels.mottmac.com

[34] Archief Edwars Bary. www.archiefedwardbary.nl

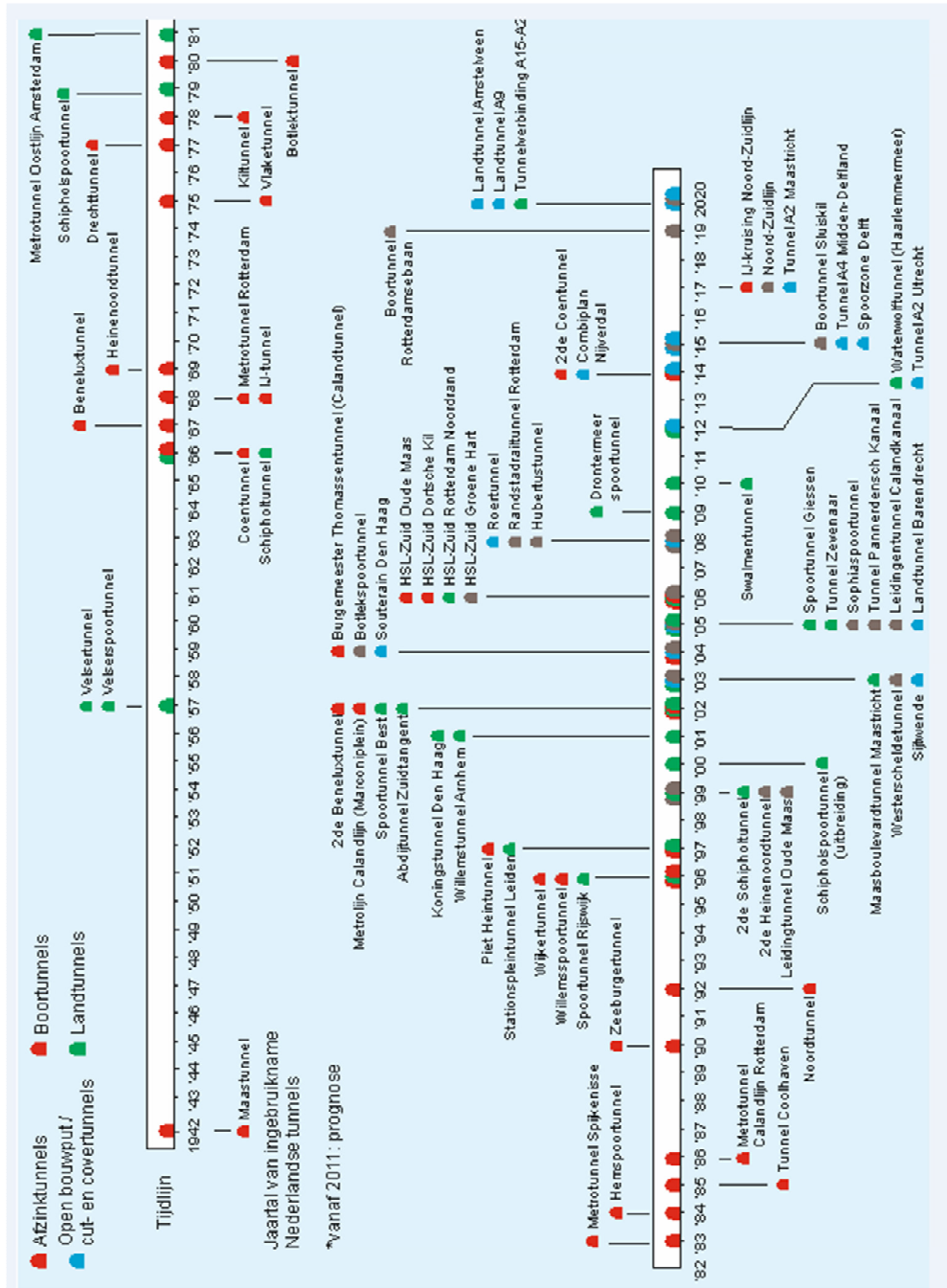
Archieven

[35] Informatie met betrekking tot zettingsmetingen van afgezonken tunnels.
Tunnelarchief Rijkswaterstaat.

PowerPoint presentaties

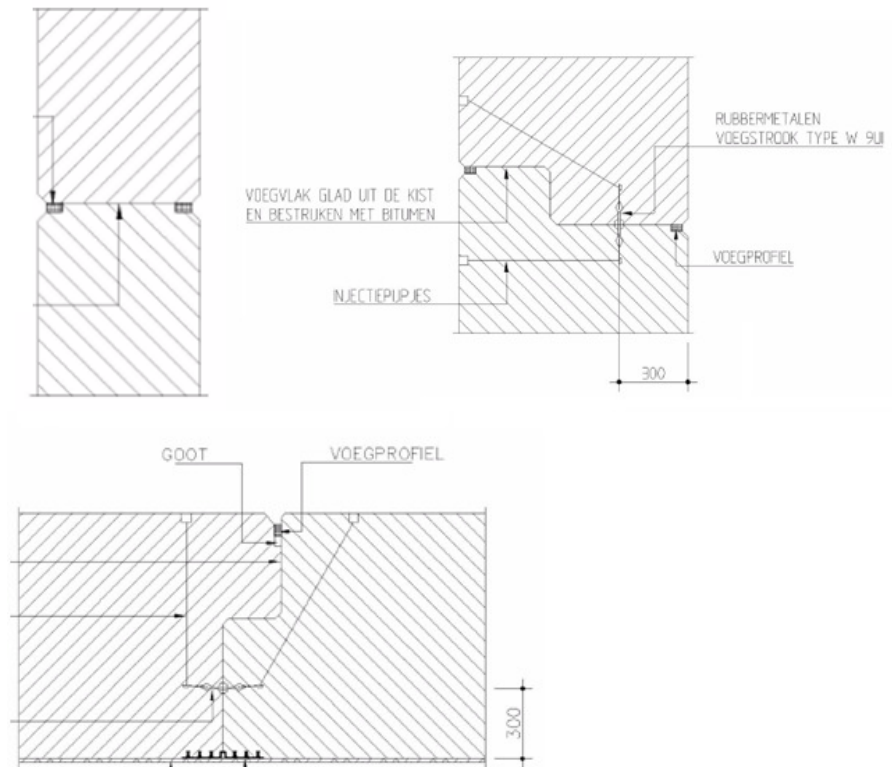
[36] *Tunnels in Nederland, Monitoring tunnels* [2005]. Leo Leeuw. Rijkswaterstaat
Bouwdienst.

Overzicht tunnels



B Dilatatievoegen

Dilatatievoegen bij een tunnel met kraagconstructie. Linksboven: middenwand. Rechtsboven: buitenwand. Onder: vloer.



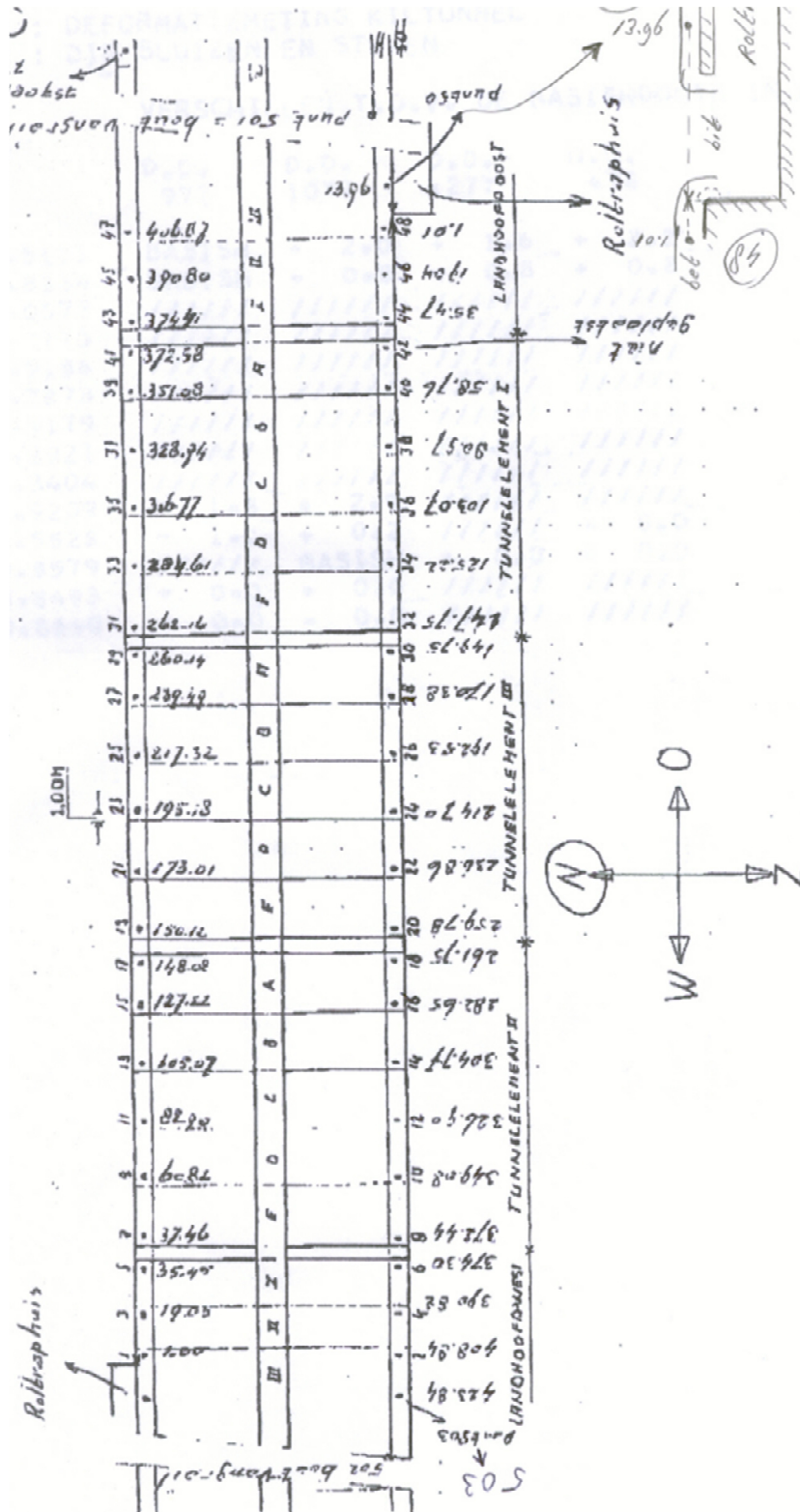
C Beschikbare meetinformatie

Naam tunnel	Object	Type meting	Herhalings- metingen	Meetpunten en/of voegen	Meetpunten per element of segment	Meetperiode	Opening tunnel
Beneluxtunnel OOST (2e)	tunnel	X, Y, Z voegafstanden	1	X, Y, Z: 88 voegen: 43	2 per segment (Y)	okt '08 - aug '11	2002
Beneluxtunnel WEST (1e)	tunnel	X, Y, Z	XY: 8 Z: 27	X, Y: 21 Z: 18		X.Y: sep '98 - aug '11 Z: aug '82 - aug '11	1967
Botlektunnel	toeritten, tunnel	Z	26	60	Tunnel: 2 per element (X) 3 per element (Y)	okt '80 - nov '08	1980
Coentunnel	toeritten	X, Y, Z voegafstanden	17	X, Y: 14 Z: 34 voegen: 76	2 per segment (X) 1 per segment (Y)	okt '90 - nov '02	1966
	toerittten, tunnel	X, Y, Z voegafstanden	1	X, Y, Z: 360 voegen: 52	variabel	mrt '06	
Drechtunnel	tunnel	Z	34	20	2 per element (X) 3 per element (Y)	nov '77 - nov '09	1977
1 ^e Heinenoordtunnel oostbuis	toeritten, tunnel	Z	18	23	2 per element (X) 3 per element (Y)	jun '90 - dec '09	1969

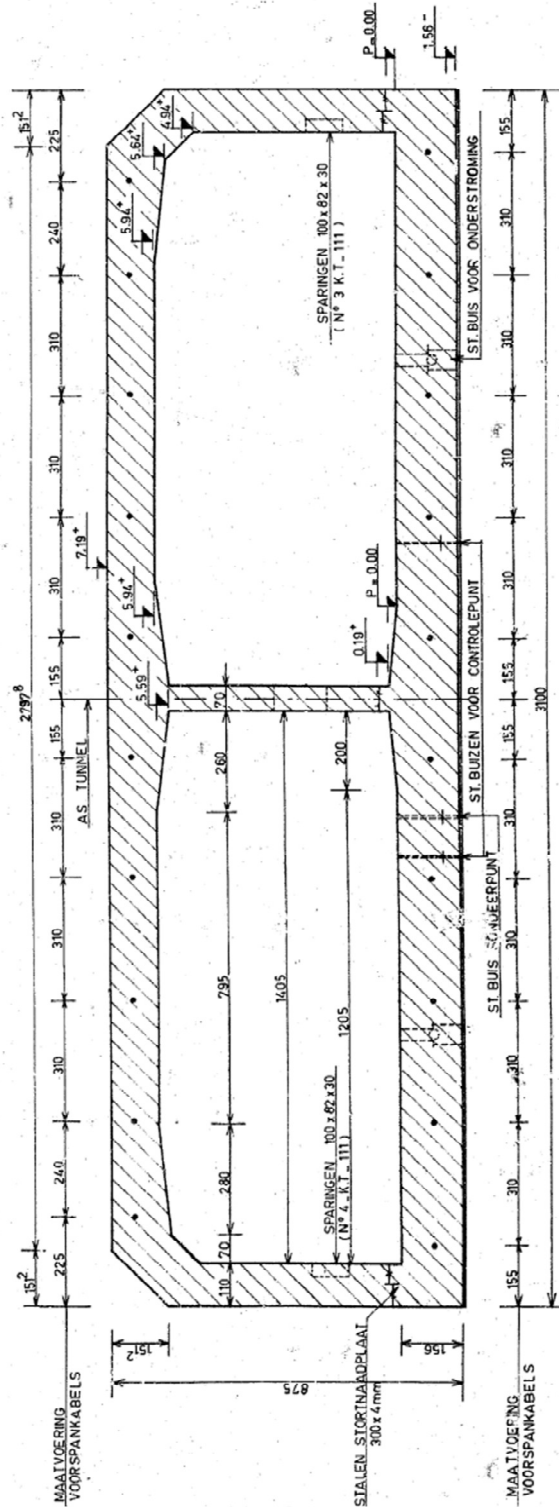
Naam tunnel	Object	Type meting	Herhalings- metingen	Meetpunten en/of voegen	Meetpunten per element of segment	Meetperiode	Opening tunnel
2 ^e Heinenoordtunnel	tunnel	Z	5	39		sep '02 – okt '08	
Kiltunnel	tunnel	Z	20	49	2 per segment (X) 1 per segment (Y)	jul '77 - apr '78 jul '01 - aug '10	1978
Noordtunnel	tunnel	Z	14	26	2 per element (X) 2 per element (Y)	sep '93 - okt '10	1992
Roertunnel	tunnel	X, Y, Z	0	X, Y: 388 Z: 160		jun –okt '08	2008
Schipholtunnel (Oosttunnel=1e Schipholtunnel)	tunnel	Z voegafstanden	2	Z: 122 voegen: 61		jun '96 - okt '08	1966
Schipholtunnel (Westtunnel=2e Schipholtunnel)	tunnel	Z voegafstanden	2	Z: 308 voegen: 124		nov '98 - feb '09	1999
Sijtwendetunnel	tunnel	X, Y, Z	0	X, Y: 78 Z: 75		jun '03	2003
Swalmentunnel	tunnel	X, Y, Z	0	X, Y: 165 Z: 61		jun '08	2008

Naam tunnel	Object	Type meting	Herhalings- metingen	Meetpunten en/of voegen	Meetpunten per element of segment	Meetperiode	Opening tunnel
Thomassentunnel	tunnel	X, Y, Z	3	100		01/'02/'03	2004
	tunnel	Z	1	119		nov '03 - aug '08	
Velsertunnel	tunnel	X, Y, Z voegafstanden	0	X, Y: 460 Z: 320 voegen: 150		nov '08 – jan '09	1957
Vlaketunnel	toeritten	voegafstanden	21	voegen: 50	Tunnel: 3 per segment (X) 2 per segment (Y)	aug '04 - jan '10	1975
		X, Y, Z voegafstanden	7	X, Y, Z: 46 voegen: 24	Toeritten: 2 per segment (X) 2 per segment (Y)	mei '08 - mrt '11	
	toeritten, tunnel	Z	9	224	3 per segment (X) 2 per segment (Y)	nov '94 - apr '07	
Wijkertunnel	toeritten, tunnel	X, Y, Z voegafstanden	4	X, Y: 32 Z: 180 voegen: 92	Tunnel/toeritten: 2 per segment (X) 2 per segment (Y)	jul '96 - okt '08	1996
Zeeburgertunnel	tunnel	X, Y, Z voegafstanden	5	X, Y: 14 Z: 32 voegen: 9	2 per element (X) 1 per element (Y)	nov '92 - dec '09	1990

D Positionering meetpunten Kiltunnel



E



F Overzicht coördinaatverschillen

NOORD														
Herhaling:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Meetpunt</i>	jul-77	sep-77	okt-77	dec-77	apr-78	jul-01	aug-01	nov-01	mrt-02	jun-02	jan-03	apr-03	jul-03	nov-03
7	-12,2468	0,0	0,6	-1,1	0,6	-8,4	-8,4	-9,7	-10,1	-9,5	-10,3	-10,8	-9,0	-9,4
9	-13,3497	0,0	0,2	-6,1	-6,7	-27,1	-26,6	-27,4	-27,0	-27,8	-27,4	-28,3	-28,1	-27,1
11	-14,3640	-3,4	-4,6	-16,1	-17,7	-56,0	-55,4	-56,6	-58,0	-57,3	-59,7	-60,3	-57,3	-57,0
13	-15,3175	-3,8	-5,3	-16,6	-17,2	-47,2	-46,1	-49,4	-50,3	-48,5	-52,2	-52,5	-48,4	-49,6
15	-16,0921	-3,9	-4,9	-13,0	-11,8	-39,4	-40,2	-41,1	-41,2	-40,1	-43,0	-43,2	-40,8	-40,4
17	-16,6530	-3,8	-2,4	-7,5	-3,2	-32,0	-32,6	-30,1	-30,3	-31,8	-31,6	-33,4	-33,1	-29,7
19	-16,6866	-3,5	-2,0	-6,9	-2,3	-29,9	-30,6	-28,3	-28,1	-29,7	-29,5	-31,5	-30,9	-27,6
21	-17,0672	-1,7	0,8	-5,2	-0,2		-6,4	-5,3	-5,0	-5,2	-6,5	-7,5	-5,5	-3,7
23	-17,2529	-0,5	1,5	-3,6	-1,1		-5,7	-5,6	-5,2	-5,3	-6,7	-7,6	-5,4	-4,0
25	-17,2495	0,1	1,6	-5,4	-3,5		-12,4	-13,8	-14,4	-13,6	-16,5	-16,8	-13,4	-12,6
27	-17,0332	0,2	2,1	-5,0	-1,6		-13,9	-13,8	-15,0	-14,2	-16,9	-17,2	-14,1	-13,1
29	-16,6627	-0,8	1,8	-2,2	0,2		-12,7	-9,5	-10,0	-11,0	-10,8	-12,4	-11,2	-8,7
31	-16,6101	-0,2	2,6	-1,6	0,7		-11,8	-8,5	-9,0	-10,1	-9,9	-11,5	-10,5	-7,8
33	-15,9961	0,0	1,0	5,0	-2,4		-18,4	-17,6	-17,8	-17,8	-19,3	-19,5	-18,3	-17,4
35	-15,1935	0,0	0,5	-5,8	-6,8		-27,9	-27,5	-28,4	-27,6	-29,5	-30,0	-27,7	-28,0
37	-14,2294	0,5	1,4	-6,3	-7,4		-32,3	-32,9	-35,5	-34,1	-36,9	-37,2	-33,8	-34,5
39	-13,2059	0,9	1,5	-6,1	-9,9		-29,7	-30,2	-32,5	-31,3	-33,4	-33,9	-30,6	-31,7
41	-12,2505												-13,6	-12,9

NOORD

Herhaling:	0	14	15	16	17	18	19	20
<i>Meetpunt</i>	jul-77	feb-04	mei-04	sep-04	dec-04	jun-05	dec-08	aug-10
7	-12,2468	-10,6	-10,0	-9,1	-10,7	-7,7	-11,8	-9,9
9	-13,3497	-27,9	-28,4	-28,4	-28,9	-27,0	-30,5	-29,7
11	-14,3640	-59,9	-59,5	-57,9	-60,1	-56,8	-63,1	-61,8
13	-15,3175	-52,6	-51,1	-49,5	-53,1	-47,6	-56,4	-53,2
15	-16,0921	-43,2	-42,5	-42,2	-44,6	-39,2	-47,4	-45,4
17	-16,6530	-32,1	-33,5	-34,2	-34,0	-31,0	-35,8	-36,9
19	-16,6866	-30,0	-31,3	-32,0	-31,8	-28,8	-33,6	-33,3
21	-17,0672	-6,3	-6,8	-6,2	-7,9	-2,6	-8,9	-7,1
23	-17,2529	-6,6	-7,1	-6,2	-8,1	-2,3	-9,3	-6,9
25	-17,2495	-15,9	-15,7	-13,7	-16,8	-10,4	-18,5	-15,5
27	-17,0332	-16,6	-16,2	-14,3	-17,2	-11,3	-19,0	-16,4
29	-16,6627	-11,1	-12,0	-12,2	-12,7	-8,3	-13,4	-13,2
31	-16,6101	-10,2	-11,1	-11,3	-11,5	-7,6	-12,4	-12,3
33	-15,9961	-19,4	-19,6	-19,3	-20,7	-16,0	-22,5	-21,3
35	-15,1935	-30,2	-29,7	-28,8	-31,1	-26,4	-33,2	-31,7
37	-14,2294	-37,3	-36,5	-34,1	-36,9	-33,2	-40,1	-37,6
39	-13,2059	-34,1	-33,2	-30,5	-33,3	-29,6	-36,3	-33,2
41	-12,2505	-13,6	-13,8	-0,4	-0,1	1,2	-1,8	-1,6

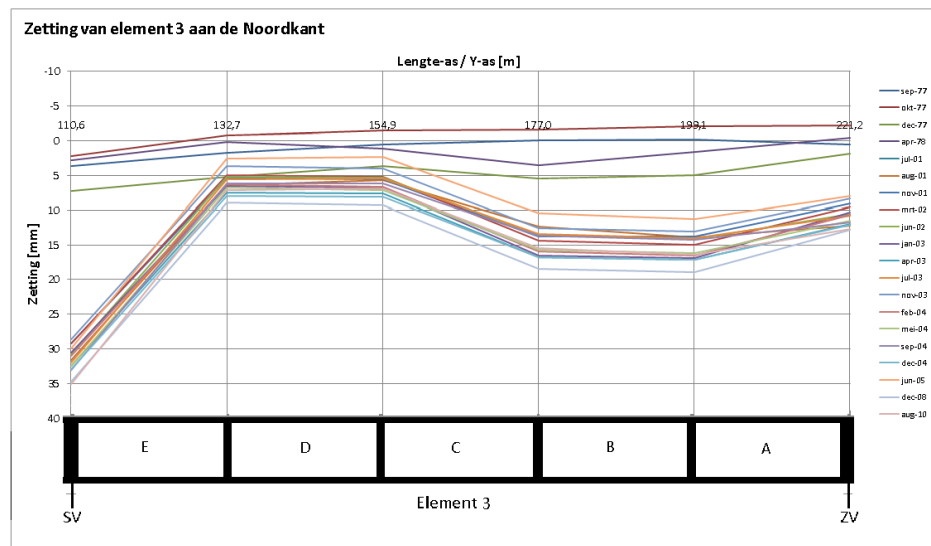
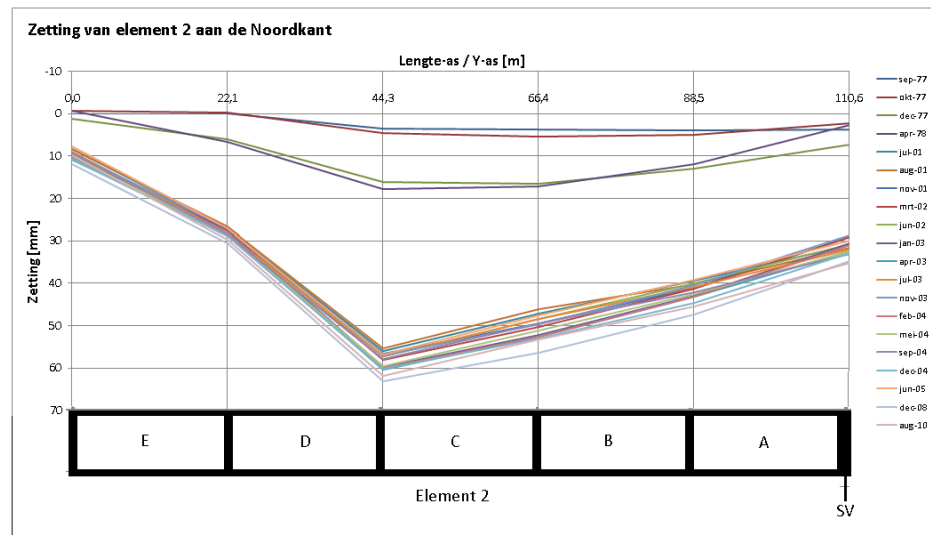
ZUID

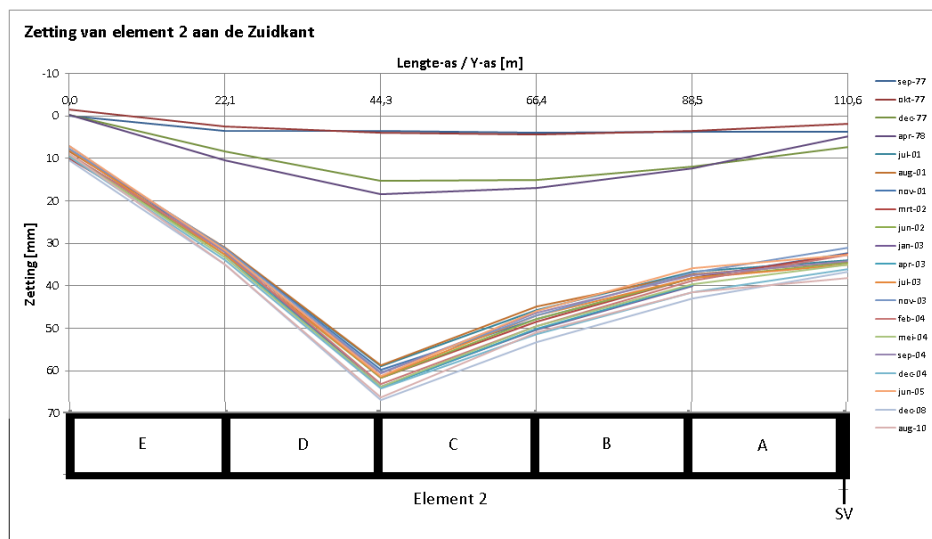
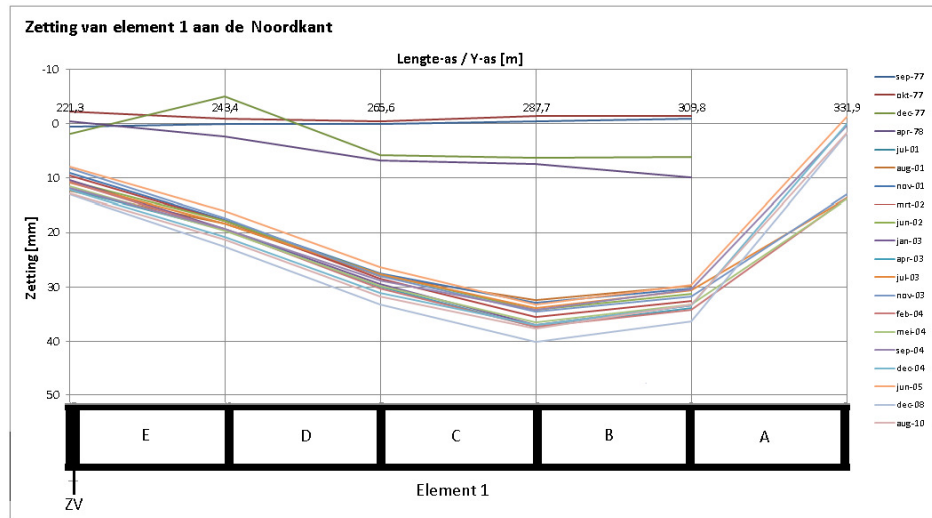
Herhaling:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Meetpunt</i>	jul-77	sep-77	okt-77	dec-77	apr-78	jul-01	aug-01	nov-01	mrt-02	jun-02	jan-03	apr-03	jul-03	nov-03
8	-12,2400	0,0	1,5	0,3	0,3	-8,0	-8,4	-9,2	-10,0	-9,4			-7,9	-7,8
10	-13,3407	-3,6	-2,4	-8,4	-10,4	-31,2	-31,0	-31,3	-31,7	-32,6	-32,0	-32,6	-32,6	-31,3
12	-14,3771	-3,5	-4,0	-15,3	-18,4	-59,0	-58,7	-59,8	-61,6	-61,6	-63,8	-64,0	-61,4	-60,4
14	-15,3299	-4,0	-4,3	-15,0	-17,0	-45,6	-44,8	-47,7	-48,5	-47,8	-50,4	-50,0	-46,9	-47,0
16	-16,1010	-3,8	-3,6	-11,8	-12,3	-36,6	-37,2	-38,1	-38,1	-38,1	-40,1	-39,7	-38,1	-36,9
18	-16,6838	-3,8	-2,1	-7,8	-5,1	-34,7	-35,2	-33,1	-33,3	-35,5			-35,9	-31,9
20	-16,7317	-3,6	-1,7	-6,8	-4,6	-33,1	-33,6	-31,2	-31,7	-33,8			-34,1	-30,1
22	-17,0727	-1,0	1,3	-4,3	-0,7		-7,2	-5,8	-6,3	-7,0	-7,4	-7,8	-6,7	-4,2
24	-17,2381	0,1	1,8	-3,1	0,1		-5,5	-5,1	-5,6	-6,4	-6,0	-7,0	-5,9	-3,4
26	-17,2297	0,8	2,4	-3,7	-2,4		-9,9	-9,9	-11,6	-11,1	-12,8	-12,9	-10,4	-9,0
28	-17,0299	0,5	2,7	-2,9	0,0		-9,4	-9,7	-11,4	-10,9	-12,2	-13,0	-10,5	-8,8
30	-16,6661	-0,2	3,2	-0,2	3,3		-7,9	-6,3	-7,1	-8,7	-7,0	-8,9	-8,5	-5,2
32	-16,6165	0,4	3,8	0,8	4,5		-7,4	-5,4	-6,3	-8,0	-23,1	-25,0	-24,5	-21,3
34	-15,9973	-0,1	1,6	-3,6	0,4		-16,5	-16,6	-17,5	-17,5	-18,0	-18,5	-17,2	-15,9
36	-15,1919	0,0	1,0	-3,4	-3,2		-24,7	-24,7	-25,8	-25,9	-25,9	-26,8	-25,5	-24,7
38	-14,2299	0,0	1,4	-5,5	-5,2		-32,8	-34,2	-36,7	-35,8	-37,3	-37,9	-34,9	-34,9
40	-13,2366	-0,2	0,9	-6,4	-8,5		-46,4	-47,2	-49,9	-49,0			-46,5	-46,4
42														

ZUID

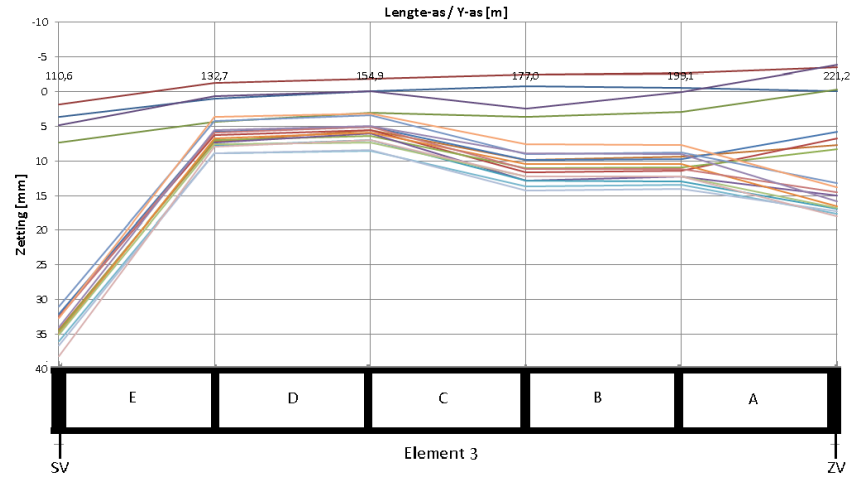
Herhaling:	0	14	15	16	17	18	19	20
<i>Meetpunt</i>	jul-77	feb-04	mei-04	sep-04	dec-04	jun-05	dec-08	aug-10
8	-12,2400	-9,0	-9,1	-7,1	-9,6	-7,0	-10,4	-8,9
10	-13,3407	-32,0	-33,4	-32,0	-34,0	-31,6	-35,0	-35,0
12	-14,3771	-63,0	-63,7	-60,6	-64,1	-61,3	-66,8	-66,2
14	-15,3299	-49,4	-49,5	-46,3	-51,3	-45,8	-53,2	-51,0
16	-16,1010	-38,8	-39,5	-37,6	-41,5	-35,8	-43,0	-41,5
18	-16,6838	-33,5	-35,9	-35	-36,9	-33,8	-37,6	-39,2
20	-16,7317	-31,7	-34,2	-33,1	-35,1	-31,6	-35,7	-37,2
22	-17,0727	-5,9	-7,6	-5,5	-8,9	-3,7	-8,9	-7,9
24	-17,2381	-5,1	-7,3	-4,9	-8,6	-3,2	-8,4	-7,0
26	-17,2297	-11,2	-12,3	-8,9	-13,7	-7,6	-14,3	-12,2
28	-17,0299	-11,2	-12,2	-9,0	-13,5	-7,7	-14,0	-12,2
30	-16,6661	-6,5	-8,7	-7,8	-9,6	-5,6	-9,2	-9,9
32	-16,6165	-22,6	-24,8	-23,8	-25,6	-21,9	-25,3	-26,0
34	-15,9973	-17,1	-18,4	-16,8	-20,0	-15,0	-20,5	-19,8
36	-15,1919	-25,8	-27,1	-24,9	-28,4	-23,7	-29,2	-28,4
38	-14,2299	-37,1	-37,5	-33,8	-38,3	-34,3	-40,3	-38,3
40	-13,2366	-48,2	-48,8	-45,1	-49,1	-45,6	-50,7	-48,8
42								

G Zettingsgrafieken

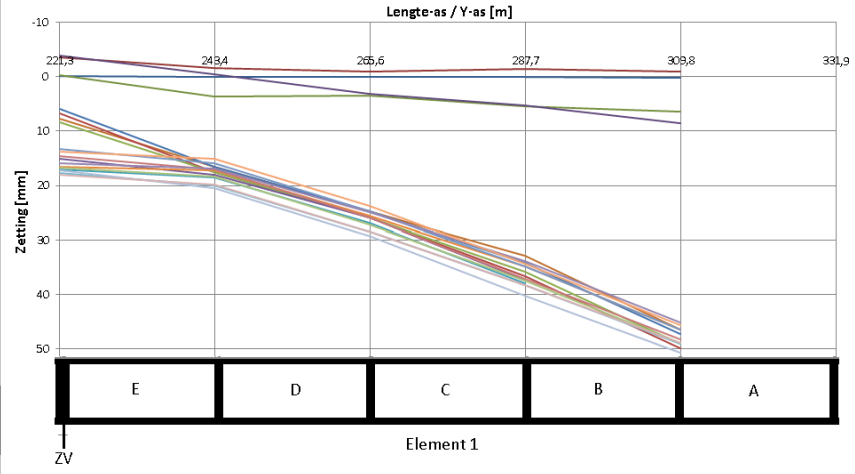




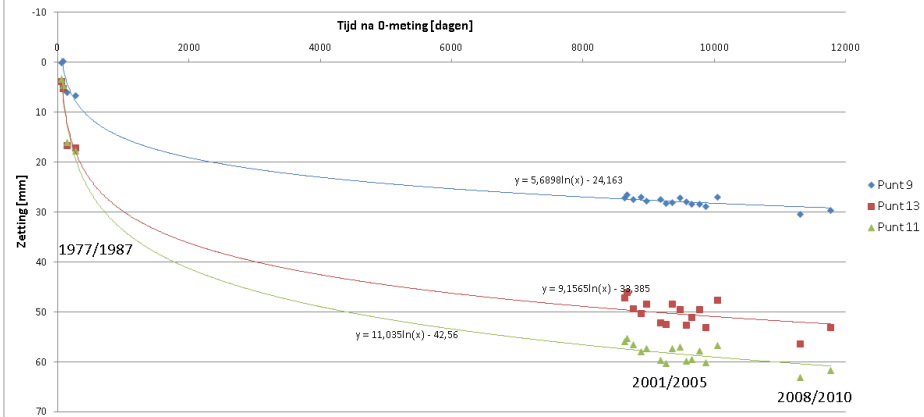
Zetting van element 3 aan de Zuidkant



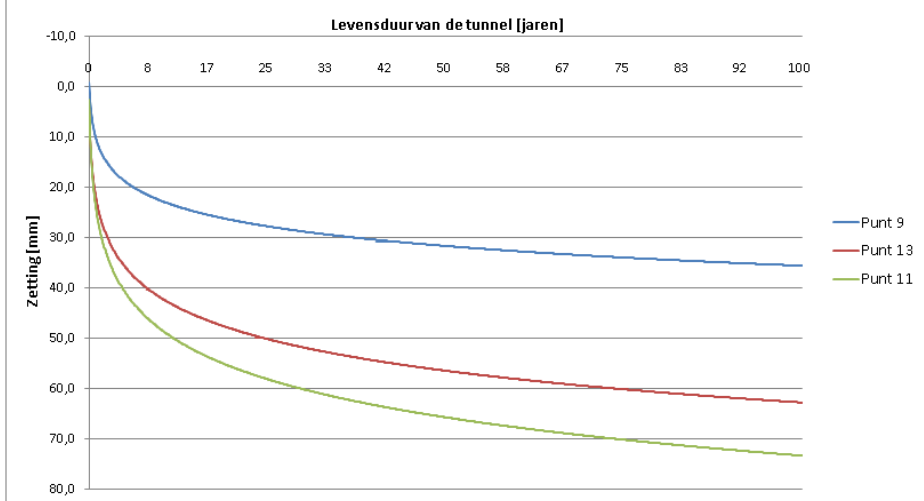
Zetting van element 1 aan de Zuidkant



Historische zettingsontwikkeling van meetpunten 9, 11 en 13



Toekomstige zettingsverwachting van meetpunten 9, 11 en 13

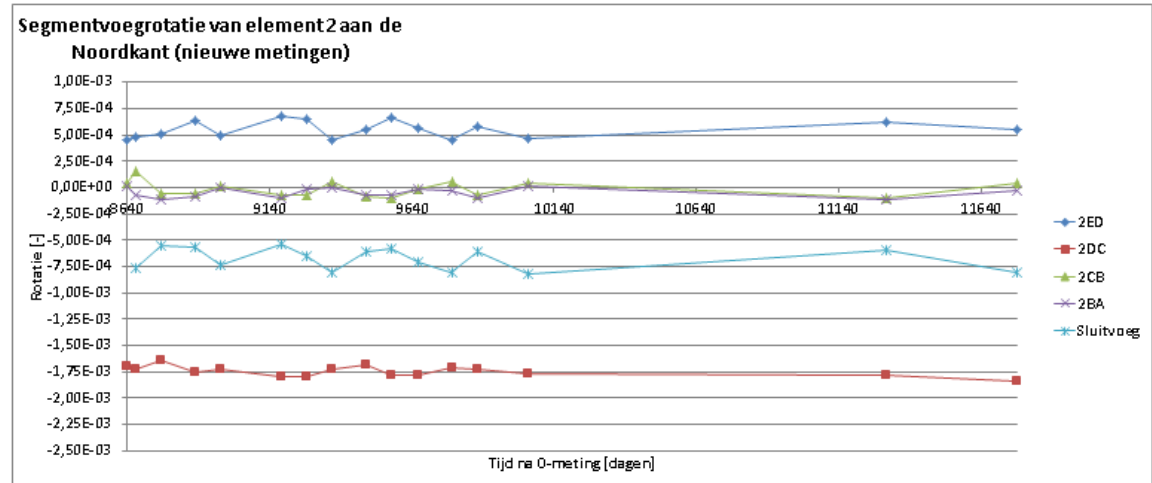
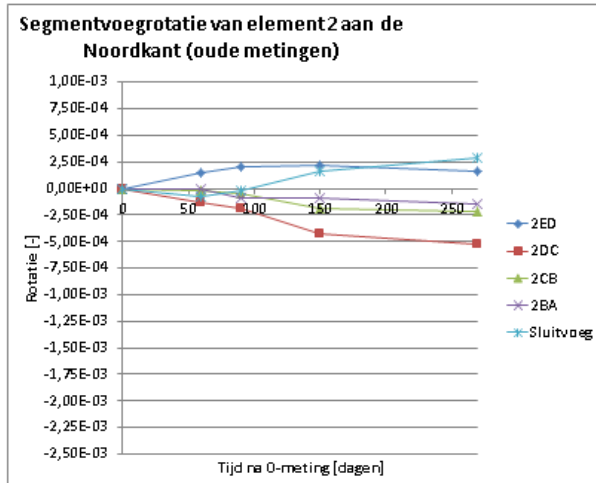


H Voegrotaties

1977/1978

2001/2005

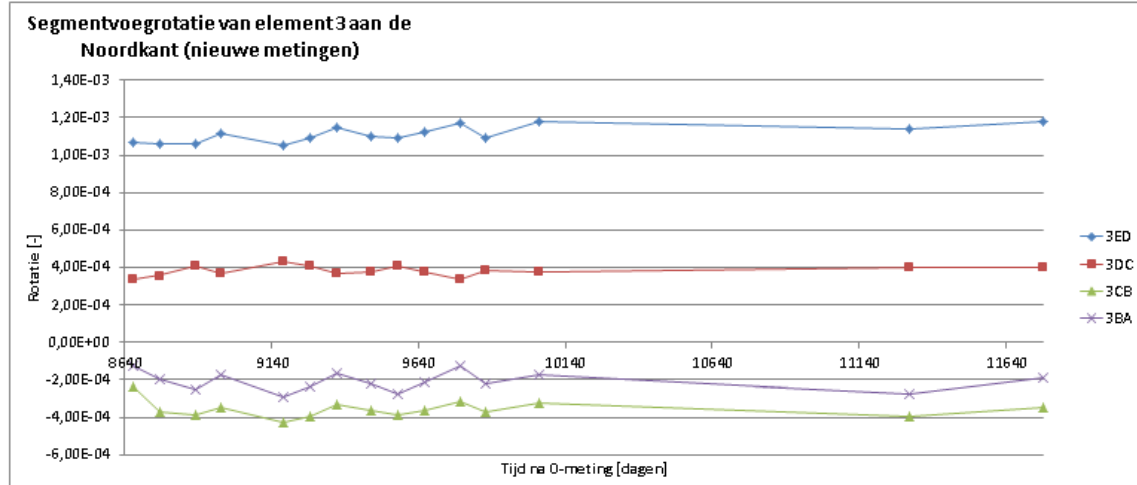
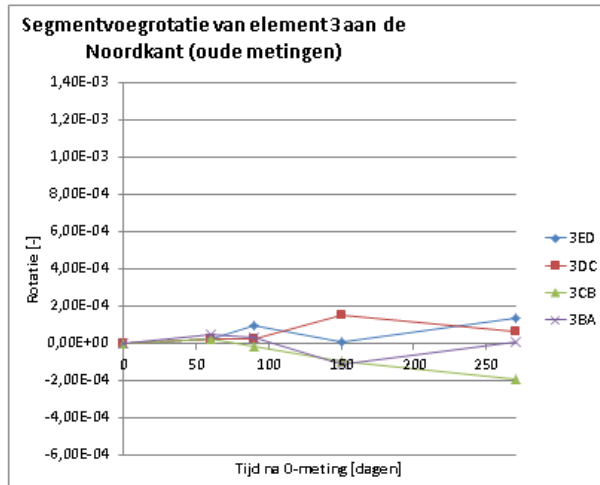
2008/
2010



1977/1978

2001/2005

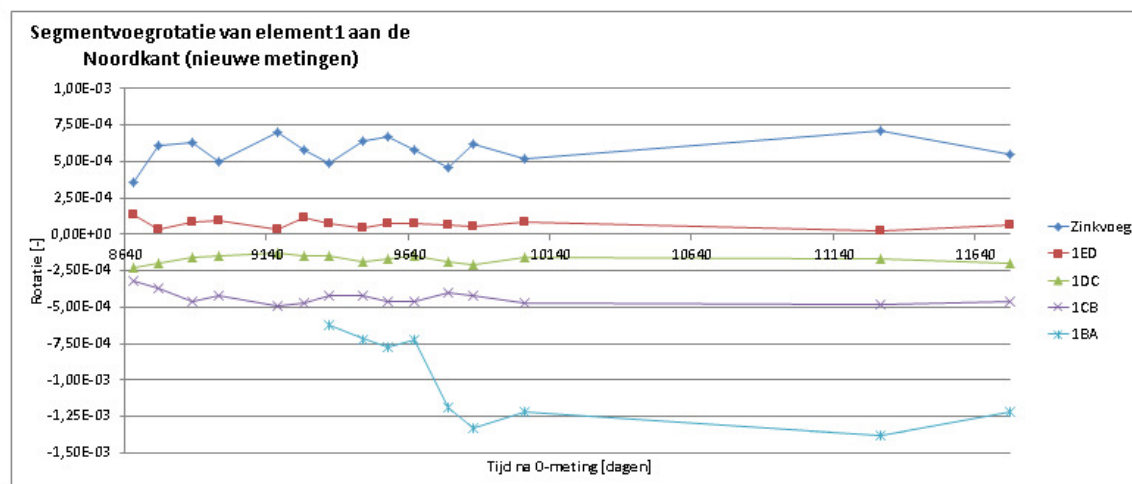
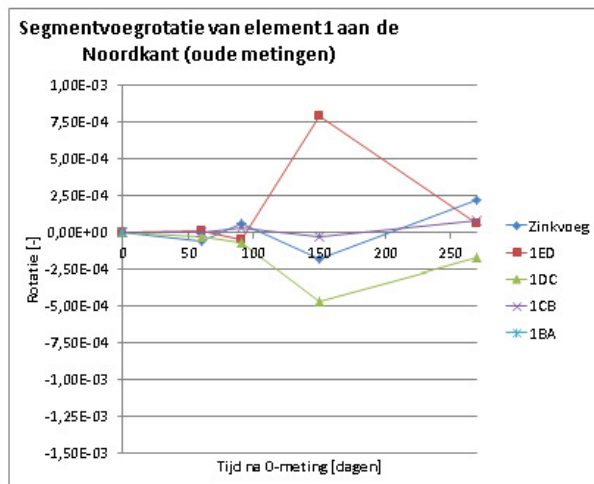
2008/
2010

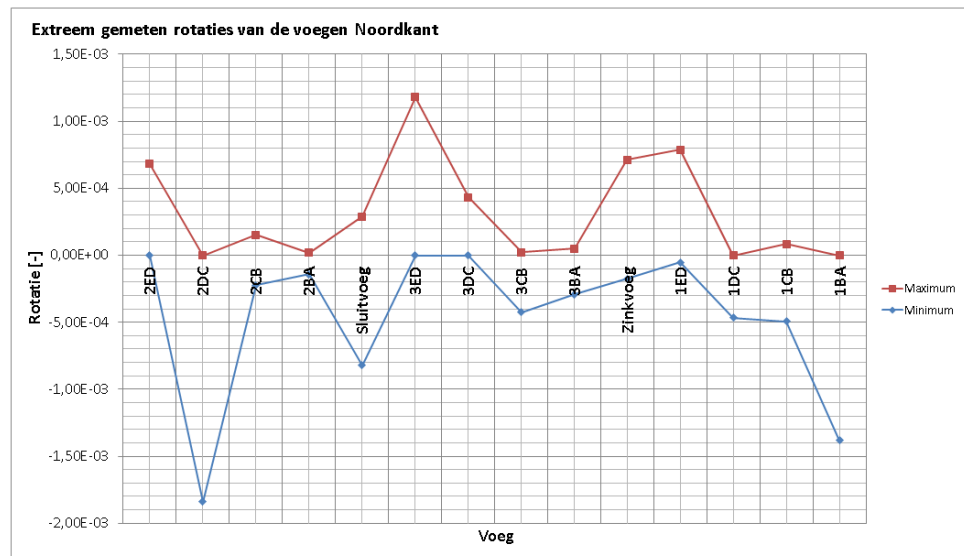


1977/1978

2001/2005

2008/
2010





		Joint	Min. θ [rad]	Max. θ [rad]
Tunnel element 2		2ED	1,537E-04	6,825E-04
		2DC	-1,839E-03	-1,356E-04
		2CB	-2,215E-04	1,537E-04
		2BA	-1,424E-04	1,996E-05
Sluitvoeg			-8,209E-04	-8,209E-04
Tunnel element 3		3ED	4,950E-06	1,180E-03
		3DC	2,709E-05	4,334E-04
		3CB	-4,243E-04	2,257E-05
		3BA	-2,919E-04	4,940E-05
Zinkvoeg			-1,747E-04	-1,747E-04
Tunnel element 1		1ED	-5,019E-05	7,891E-04
		1DC	-4,661E-04	-2,263E-05
		1CB	-4,933E-04	8,598E-05
		1BA	-1,380E-03	-6,202E-04

Extreme waarden van segmentvoegrotaties

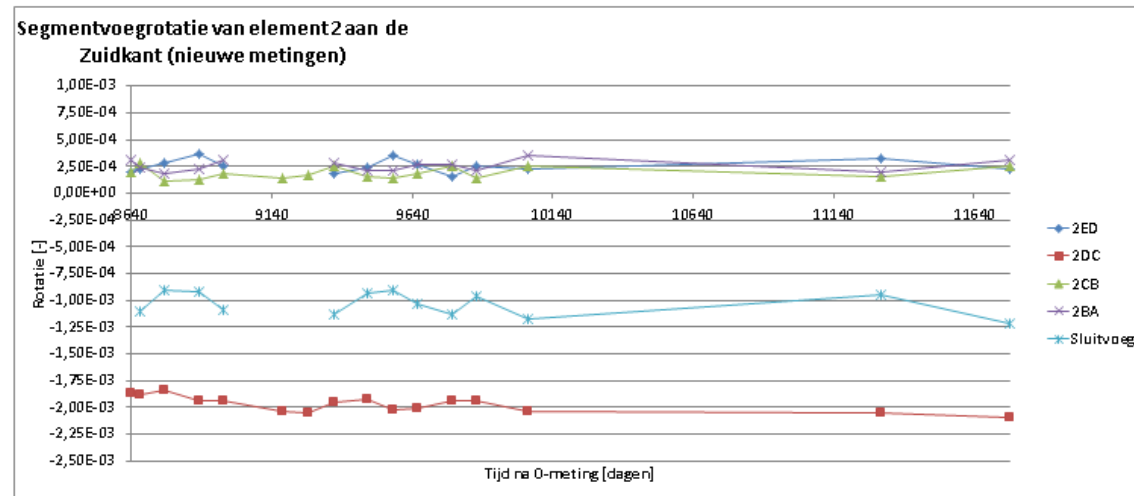
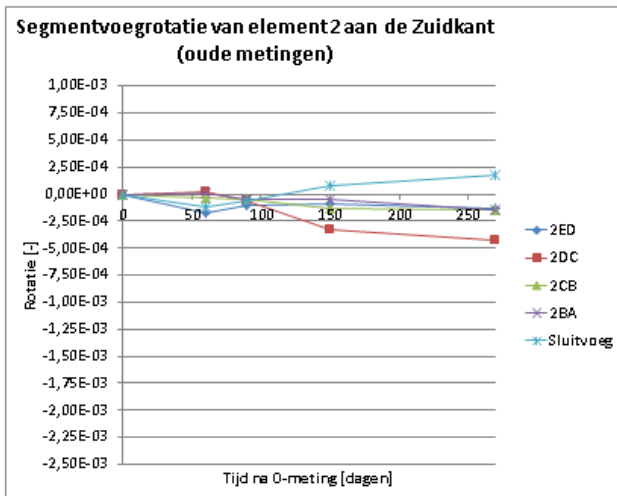
De onvervormde toestand (rotatie is 0) wordt in de grafiek weergegeven waar

- een maximum niet bekend is of kleiner is dan 0.
- een minimum niet bekend is of groter is dan 0.

1977/1978

2001/2005

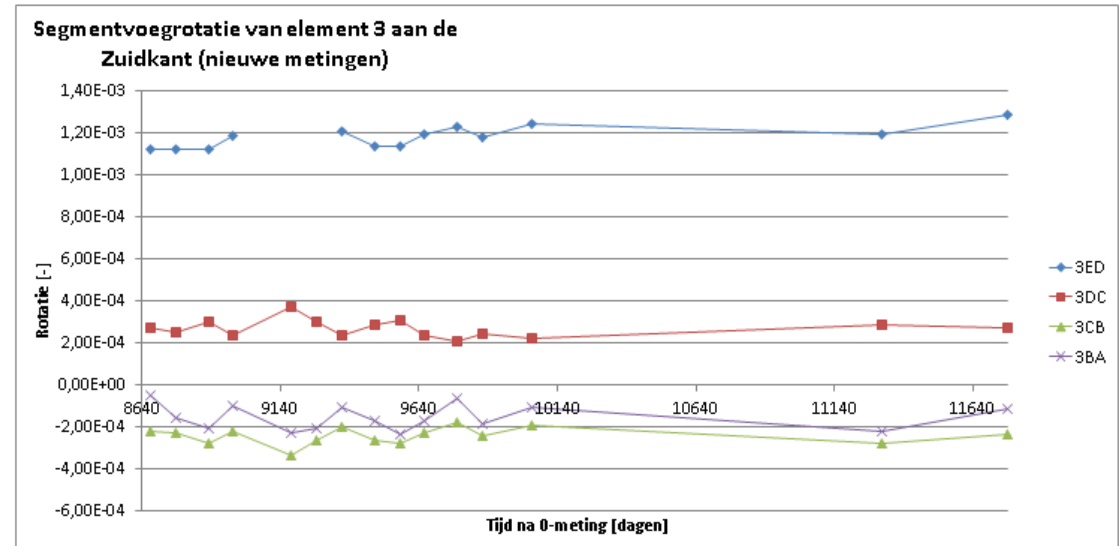
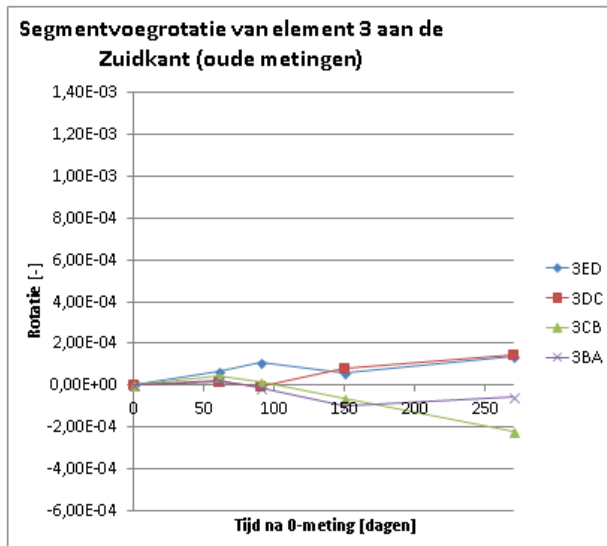
2008/
2010



1977/1978

2001/2005

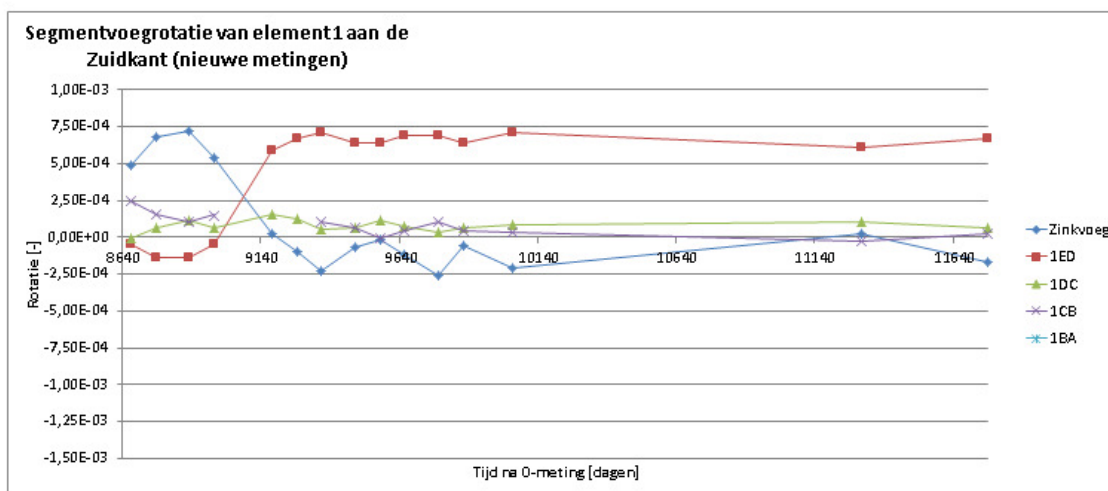
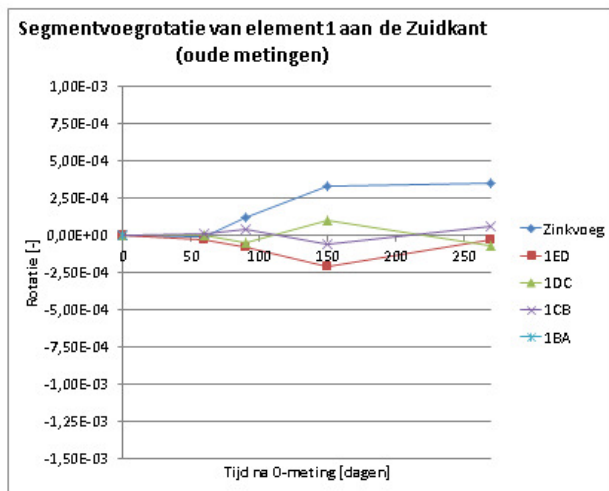
2008/
2010

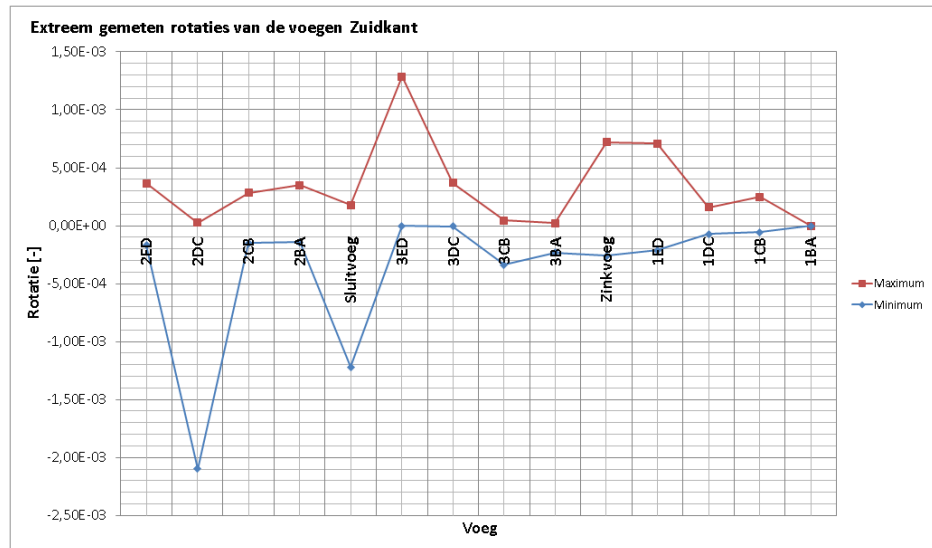


1977/1978

2001/2005

2008/
2010





	Joint	Min. θ [rad]	Max. θ [rad]
Tunnel element 2	2ED	-1,681E-04	3,649E-04
	2DC	-2,097E-03	2,712E-05
	2CB	-1,491E-04	2,847E-04
	2BA	-1,431E-04	3,532E-04
Sluitvoeg		-1,217E-03	1,785E-04
Tunnel element 3	3ED	5,933E-05	1,290E-03
	3DC	-4,514E-06	3,702E-04
	3CB	-3,341E-04	4,514E-05
	3BA	-2,318E-04	2,098E-05
Zinkvoeg		-2,594E-04	7,218E-04
Tunnel element 1	1ED	-2,093E-04	7,078E-04
	1DC	-7,240E-05	1,584E-04
	1CB	-5,430E-05	2,489E-04
	1BA	niet bekend	niet bekend

Extreme waarden van segmentvoegrotaties

De onvervormde toestand (rotatie is 0) wordt in de grafiek weergegeven waar

- een maximum niet bekend is of kleiner is dan 0.
- een minimum niet bekend is of groter is dan 0.

I Torsie

		sep-77	okt-77	dec-77	apr-78	jul-01	aug-01	nov-01	mrt-02	jun-02	jan-03	apr-03
Verschilzetting tussen punten	14-13	0,2	-1	-1,6	-0,2	-1,6	-1,3	-1,7	-1,8	-0,7	-1,8	-2,5
	16-15	-0,1	-1,3	-1,2	0,5	-2,8	-3	-3	-3,1	-2	-2,9	-3,5
	18-17	0	-0,3	0,3	1,9	2,7	2,6	3	3	3,7		
	26-25	-0,7	-0,8	-1,7	-1,1	0	-2,5	-3,9	-2,8	-2,5	-3,7	-3,9
	28-27	-0,3	-0,6	-2,1	-1,6	0	-4,5	-4,1	-3,6	-3,3	-4,7	-4,2
	30-29	-0,6	-1,4	-2	-3,1	0	-4,8	-3,2	-2,9	-2,3	-3,8	-3,5
Verschil tussen verschilzetting tussen punten	14-13 / 16-15	0,3	0,3	0,4	0,7	1,2	1,7	1,3	1,3	1,3	1,1	1
	16-15 / 18-17	0,1	1	1,5	1,4	5,5	5,6	6	6,1	5,7		
	26-25 / 28-27	0,4	0,2	0,4	0,5	0	2	0,2	0,8	0,8	1	0,3
	28-27 / 30-29	0,3	0,8	0,1	1,5	0	0,3	0,9	0,7	1	0,9	0,7
Procentuele toename	(V2-V1)/V1 element 2	-67%	233%	275%	100%	358%	229%	362%	369%	338%		
	(V2-V1)/V1 element 3	-25%	300%	-75%	200%	0%	-85%	350%	-12%	25%	-10%	133%

		jul-03	nov-03	feb-04	mei-04	sep-04	dec-04	jun-05	dec-08	aug-10
Verschilzetting tussen punten	14-13	-1,5	-2,6	-3,2	-1,6	-3,2	-1,8	-1,8	-3,2	-2,2
	16-15	-2,7	-3,5	-4,4	-3	-4,6	-3,1	-3,4	-4,4	-3,9
	18-17	2,8	2,2	1,4	2,4	0,8	2,9	2,8	1,8	2,3
	26-25	-3	-3,6	-4,7	-3,4	-4,8	-3,1	-2,8	-4,2	
	28-27	-3,6	-4,3	-5,4	-4	-5,3	-3,7	-3,6	-5	
	30-29	-2,7	-3,5	-4,6	-3,3	-4,4	-3,1	-2,7	-4,2	
Verschil tussen verschilzetting tussen punten	14-13 / 16-15	1,2	0,9	1,2	1,4	1,4	1,3	1,6	1,2	1,7
	16-15 / 18-17	5,5	5,7	5,8	5,4	5,4	6	6,2	6,2	6,2
	26-25 / 28-27	0,6	0,7	0,7	0,6	0,5	0,6	0,8	0,8	
	28-27 / 30-29	0,9	0,8	0,8	0,7	0,9	0,6	0,9	0,8	
Procentuele toename	(V2-V1)/V1 element 2	358%	533%	383%	286%	286%	362%	287%	417%	265%
	(V2-V1)/V1 element 3	50%	14%	14%	17%	80%	0%	12%	0%	