

Ingegoten spoor op bruggen
Onderzoek naar prestatieverbeteringen voor verlengen van
levensduur en snellere reparatie van ingegoten spoor op
bruggen
Jeroen van Wessem
4100727

Bacheloreindwerk
Ingegoten spoor op bruggen
Onderzoek naar prestatieverbeteringen voor verlengen van levensduur en snellere reparatie van ingegoten
spoor op bruggen

door

Jeroen van Wessem

Bachelor of Science
Civiele Techniek

Technische Universiteit Delft

Begeleider:	Dr. V.L. Markine	TU Delft (CiTG, Railbouw)
2e Begeleider:	Dr. I.Y. Shevtsov	ProRail (Asset Management, Civiele Techniek)

Begin: 22 April 2016
Eind: 20 Juni 2016

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Structural Engineering / Railbouw

Dit verslag zal beschikbaar komen op <http://repository.tudelft.nl/>

Inhoudsopgave

Voorwoord	6
Samenvatting.....	7
1 Inleiding	8
2 Probleemstelling en onderzoeksvragen.....	9
2.1 Probleemstelling	9
2.2 Doelstelling.....	9
2.3 Onderzoeksvragen	9
2.4 Oplossingsstrategie	9
3 Literatuuronderzoek spoorwegconstructies	11
3.1 Bovenbouw constructies.....	11
3.1.1 Ballastspoor.....	11
3.1.2 Directe bevestiging	12
3.1.3 Prefab platenspoor	12
3.1.4 Ingestorte dwarsliggersystemen	13
3.1.5 Elastisch ingegoten dwarsligger of blokkenspoor.....	13
3.1.6 Elastisch ingegoten spoorstaaf	14
3.2 Lasverbindingen	14
3.2.1 Thermietlassen.....	14
3.2.2 Bekistlassen	15
3.2.3 Stomplassen / Afbrandstuiklassen.....	15
3.3 Overige relevante spoorelementen	15
3.3.1 Compensatieinrichtingen	15
3.3.2 Pockets	16
3.4 Vervolg van het onderzoek	16
4 Elastisch ingegoten spoorstaaf constructie	17
5 Optredende problemen bij ingegoten spoor op spoorbruggen.....	19
5.1 Lasverbindingen	19
5.2 Zwevend spoor	20
5.3 Tijdsintensieve vervanging spoor.....	20
5.4 Conclusie probleemanalyse.....	21
6 Onderzoek naar alternatieve oplossingen	22
6.1 Constructie	22
6.1.1 Plastic dek met boutverbindingen	22
6.1.2 Elastisch ingegoten plastic dwarsliggerconstructie of plastic blokkenspoor.....	23
6.2 Reparatietechnieken.....	23
6.2.1 Versnelde vervanging.....	23
6.3 Ondersteuning van lasverbinding.....	24
6.3.1 Demonteerbare ondersteuning	24
6.3.2 Demonteerbare ingegoten ondersteuning.....	25
7 Ontwerp praktisch toepasbare oplossing.....	29
8 Conclusie	33
8.1 Beantwoording onderzoeksvragen.....	34

9	Aanbevelingen	35
9.1	Aanbevelingen voor onderzoek	35
9.2	Aanbevelingen voor uitvoering.....	35
10	Bibliografie	37
11	Bijlages	38
11.1	Bijlage Interview Edilon)(Sedra	38
11.2	Bijlage voegloos spoor op continue elastische ondersteuning	40
11.3	Bijlage Paper Eszter Ludvigh 2001	42
11.4	Bijlage Life Cycle Cost Analysis Arjen Zoeteman	55
11.5	Bijlage Constructiekening ingegoten spoor.....	64

Voorwoord

Aan het einde van de bacheloropleiding Civiele Techniek dient er een Bacheloreindwerk geschreven te worden. Aan de hand van een onderzoek wordt de kennis die is opgedaan gedurende de opleiding gebruikt. Met veel plezier heb ik heb afgelopen kwartaal kennis opgedaan over een onderwerp dat in de bachelorfase van Civiele Techniek nauwelijq aan bod komt. Vanaf het begin ben ik op zoek geweest naar een praktisch onderwerp waarin ik op zoek kon gaan naar de oplossing voor een probleem.

In het rapport heb ik gezocht naar een oplossing voor de problematiek die momenteel heerst bij lasverbindingen en reparatiewerkzaamheden die plaats vinden bij ingegoten spoor op stalen spoorbruggen. Naar aanleiding van problemen op de de Moerdijkspoorbrug die zijn ontstaan in de weken voorafgaand aan het onderzoek, kwam de vraag vanuit spoorbeheerder ProRail om het probleem te proberen te belichten. Gedurende het onderzoek heb ik veel tijd moeten steken in het leren van de railbouwkunde. In de bacheloropleiding komt railbouw bescheiden aan bod, waardoor de meeste kennis hierover nog moest worden opgedaan. Ik heb met veel plezier over de verschillende constructiemethodes geleerd, echter heeft het me erg veel tijd gekost. Hierdoor was voor de inhoudelijke diepgang weinig tijd over om het rapport technisch te onderbouwen. De resultaten zijn hierdoor vooral aanbevelingen geworden voor een uitgebreider onderzoek.

Gedurende het onderzoek heb ik van vele kanten hulp gekregen bij het onderzoek. Allereerst wil ik dr. Ir. Amy de Man van het bedrijf Edilon)(Sedra heel erg bedanken voor alle informatie en de demonstraties van het ingegoten spoor. Alsvolgende wil ik Ir. David Vermeij die mij namens StruktonRail heeft geholpen in de vragen over de uitvoeringskant van alle aspecten rondom ingegoten spoor. Mijn grootste dank gaat uit naar mijn beiden begeleiders, dr. Ir Valeri Markine en dr. Ir. Ivan Shevtsov die mij hebben begeleid. Beiden waren op ieder moment bereikbaar voor hulp en ik kon hen voor vele vragen benaderen. Daarnaast wil ik mijn dank uitspreken aan ProRail die de onderzoeksvraag beschikbaar hebben gesteld en voor de mogelijkheden om aanwezig te zijn bij werkoverleggen over de problematiek. Dit heeft mij zeer veel inzicht gegeven in de railbouw.

Ik ben dankbaar voor de manier waarop ik de mogelijkheid heb gekregen om van een zeer specifiek onderwerp te kunnen leren. Naast het doen van een individueel onderzoek heb ik veel geleerd over de railbouw. Ook ben ik erg blij voor de mogelijkheid om kennis op te doen over de praktische uitwerking van civieltechnische kennis.

Jeroen van Wessem
Delft, Juni 2016

Samenvatting

In dit verslag wordt een alternatieve uitvoering gezocht voor de intensieve reparatiewerkzaamheden van ingegoten spoorstaaf constructies op stalen spoorbruggen.

Gedurende het onderzoek is informatie ingewonnen door gesprekken met verschillende bedrijven. Allereerst is gesproken met ProRail over de problematiek en de probleemstelling. Vervolgens heeft een gesprek plaatsgevonden met het bedrijf Edilon (Sedra welke de ontwikkelaar is van het ingegoten spoor en de wereldwijd marktleider hierin is. Ook is gesproken met aannemer StruktonRail over de reparatie en uitvoering van ingegoten spoor op de Moerdijkbrug. Op deze manier is een volledig beeld gevormd van de problemen en mogelijkheden. Er is geprobeerd om een onafhankelijk standpunt in te nemen waardoor zowel in gesprek is gegaan met de opdrachtgever en spoorbeheerder (ProRail), de ontwikkelaar en verkoper van het ingegoten spoor (Edilon) (Sedra en de aannemer StruktonRail).

In het verslag wordt allereerst informatie ingewonnen over de verschillende voorkomende spoorssystemen dit is te lezen in hoofdstuk 3 Literatuuronderzoek spoorwegconstructies. Vervolgens wordt het probleem onderzocht om de precieze probleemgebieden te analyseren. Er wordt inzichtelijk gemaakt wat de oorzaken van de huidige problematiek zijn. Deze oorzaken zijn te wijten aan problematiek met de lasverbindingen, problematiek door het lokaal niet ondersteunde spoor en de ingewikkelde reparatiewerkzaamheden. De oorzaken van de problematiek zijn te lezen in hoofdstuk 5 Optredende problemen bij ingegoten spoor op spoorbruggen.

Hierna worden de mogelijke oplossingsrichtingen geformuleerd, waarin vele mogelijkheden aan bod komen. Er wordt gekeken naar varianten in constructietypes, reparatiewerkzaamheden en lokale ondersteuning. Op deze manier wordt een integrale analyse van het probleem gedaan en wordt gezocht naar oplossingen. In het verslag worden verschillende varianten vergeleken en wordt een aanbeveling gedaan voor de verbetering van de huidige situatie. De belangrijkste uitkomsten hiervan zijn het vergroten van de ruimte van pockets waardoor zowel problemen met de lasprocedure als andere reparatiewerkzaamheden verbeteren en versnellen. Echter zal bij een vergroting van de pockets rekening moeten worden gehouden met extra buiging van de spoorstaaf waardoor een verticale ondersteuning noodzakelijk is. Aangezien in de pockets zelf ruimte moet blijven voor werkzaamheden is het beste alternatief om gebruik te maken van een demonteerbare ondersteuning. De volledige oplossingsanalyse staat beschreven in hoofdstuk 6 Onderzoek naar alternatieve oplossingen.

Aangezien in de oplossingsanalyse enkele zeer duidelijk aanbevelingen voor verbeteringen naar voren kwamen is vervolgens een conceptontwerp gemaakt met deze punten. Het ontwerp is gebaseerd op een demonteerbare ondersteuning om de lasverbinding te dragen. Er is gekozen om de lasverbinding te dragen door middel van een stalen goot te plaatsen onder de bestaande constructie en deze vervolgens in te gieten in het edilon corkelast. Een deel van de constructie kan echter ook worden ondersteund door deels gebruik te maken van geprefabriceerd CorkElast. Hierdoor zou de ingietmassa in een fabriek in de juiste vorm moeten worden ingegoten zodat deze kan worden geplaatst rondom de spoorstaaf. Hiervoor is echter extra onderzoek nodig naar de haalbaarheid. Het volledige ontwerp van de demonteerbaar ingegoten spoorstaaf is te vinden in hoofdstuk 7 Ontwerp praktisch toepasbare oplossing.

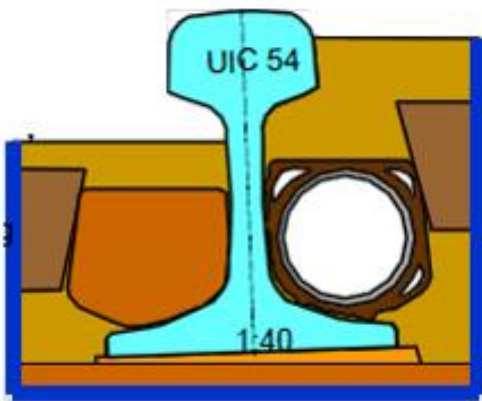
De aanbevelingen zijn zowel voor het veranderen van de probleemsituatie die nu voorkomt op huidige constructies, maar is vooral ook bedoeld als aanbeveling voor de constructie van toekomstige kunstwerken. Er wordt een onderscheid gemaakt in aanbevelingen die uitvoerbaar zijn op de huidige spoorbruggen en op aanbevelingen voor methodes waarvoor extra onderzoek nodig is. De belangrijkste aanbeveling is om het voorgedragen ontwerp te testen voor haalbaarheid in de spoorconstructie.

1 Inleiding

In de praktijk wordt sinds enkele jaren gebruik gemaakt van een constructie van ingegoten spoorstaaf op een spoorbrug. Dit is een van de vormen van een directe bevestiging die worden toegepast in de railbouw. Dit heeft als grondslag dat het praktisch goed uitvoerbaar is en dat met deze methode geluidshinder wordt geminimaliseerd. De spoorstaaf wordt ingegoten in een polymeer van kurkrubber (bijvoorbeeld het door Edilon)(Sedra ontwikkelde corkelast) zoals te zien is in Figuur 1. De spoorstaaf wordt op deze manier over de gehele lengte homogeen ondersteund met een bepaalde toegestane elasticiteit.

Dit constructieprincipe biedt echter ook nadelen. In het geval dat er een stuk van de spoorstaaf moet worden vervangen door slijtage, een scheur of een breuk dan moet over de volledige lengte van het brug element de spoorstaaf uit de constructie worden vervangen. Het komt regelmatig voor dat een spoorstaaf een breuk vertoont ter plaatse van een lasverbinding, dit is zichtbaar in Figuur 2. Bij ingegoten spoor worden elementen van tot wel 150 meter toegepast die in zijn geheel vervangen dienen te worden als er schade aan de spoorstaaf optreedt. Het vervangen van een dergelijk element kost veel tijd en geld, waardoor het treinverkeer op dit traject lang uitgeschakeld is. Dit komt omdat over de gehele lengte in dit geval de spoorstaaf uit de constructie moet worden gehaald en de constructie moet worden schoongemaakt en ontvet, daarna dient de nieuwe spoorstaaf vastgelast en ingegoten te worden en moet dit drogen totdat deze weer op sterkte is. Dit gehele proces zorgt voor een buitendienststelling van het traject van ongeveer 36 uur en kan oplopen indien meerdere spoorstaven moeten worden vervangen op dit traject.

Vanuit ProRail is de opdracht gegeven om het probleem in eerste instantie te analyseren. Het doel is om de oorzaken van de problematiek te achterhalen en hieruit op zoek te gaan te naar geschikte oplossingen. In een later stadium zou het mogelijk kunnen zijn om een ontwerpvoorstel te maken voor verbeteringen aan de constructie. De uitgangspositie was om het probleem objectief aan te pakken en volledig inzichtelijk te maken.



Figuur 1 Ingegoten spoor



Figuur 2 Breuk van een lasverbinding in ingegoten spoor

2 Probleemstelling en onderzoeksvragen

2.1 Probleemstelling

Het afsluiten van de spoorwegen dient uiteraard zoveel mogelijk voorkomen te worden. Vooral tijdens de spitsuren is een buitendienststelling van het spoor een groot probleem. Vandaar dat onderzocht dient te worden of er alternatieven zijn die de hoeveelheid van onderhoud aan ingegoten spoorconstructies op spoorbruggen kunnen verminderen. Dit zou kunnen worden benaderd op verschillende manieren. Ofwel kan er worden gekeken naar constructies die minder snel moeten worden vervangen doordat ze een langere levensduur hebben, ofwel naar alternatieve constructiemogelijkheden die efficiënter en sneller vervangen kunnen worden, waardoor het treinverkeer hiervan minder hinder ondervindt.

Als praktisch onderwerp wordt gekeken naar de Moerdijkbrug ten zuiden van Dordrecht. Deze brug heeft een als bovenbouwconstructie een ingegoten spoorstaaf en heeft meerdere malen problemen ondervonden van onderhoudswerkzaamheden. Zo lag van 13 t/m 15 April 2016 al het spoorverkeer voor 3 dagen stil door meerdere scheurtjes in de lasverbindingen tussen de sporen. Vanwege de tijdrovende reparatiemethode kost dit veel geld en problemen voor de vele reizigers op het traject. Het onderzoek naar snellere reparatiemethoden is dus zowel zeer gewenst als een interessante huidige uitdaging.

2.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om een praktische oplossing te vinden om de reparatietijd waarmee schade aan een ingegoten spoorstaaf op een brug kan worden verholpen te verkleinen en hiermee de sluiting van spoorbruggen voor langere tijd te verminderen.

2.3 Onderzoeksvragen

Hoofdvraag

Is er een beter alternatieve praktische oplossing om de reparatietijd voor het vervangen van een ingegoten spoorstaaf op een brug te verkorten?

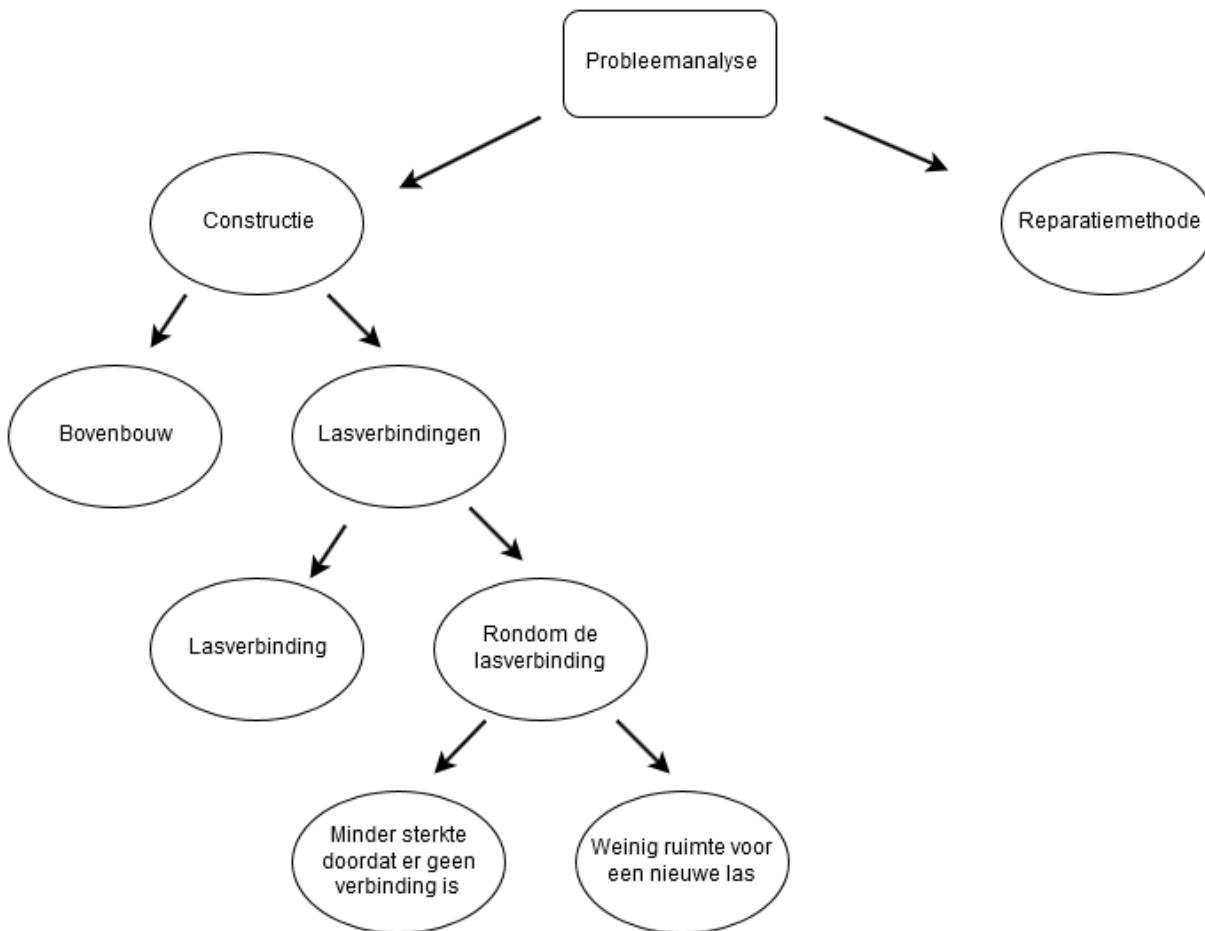
Deelvragen

- Is er een alternatieve constructiemethode waardoor de frequentie voor het vervangen van de spoorstaven afneemt?
- Is er een alternatieve constructiemethode waardoor het vervangen van de spoorstaven sneller kan worden uitgevoerd?
- Is er een alternatieve methode om de spoorstaaf te repareren zonder deze in zijn geheel te hoeven verwijderen?

2.4 Oplossingsstrategie

Zoals eerder beschreven is het onderhoud en reparatiewerkzaamheden aan ingegoten spoorstaven moeilijk uitvoerbaar. Dit komt doordat de spoorstaven over grote lengtes in zijn geheel zijn ingegoten in het kurkrubber. Indien op een klein stuk in de spoorstaaf een scheur of breuk voorkomt, kan dit niet zomaar worden gerepareerd aangezien hiervoor geen ruimte rondom de spoorstaaf is. De spoorstaaf is hierdoor nauwelijks vatbaar voor problemen met het materiaal, dus is onderhoud zelden noodzakelijk. Toch komen er soms scheuren of breuken voor in de spoorstaaf waardoor het gedeeltelijk vervangen van de spoorstaaf moet gebeuren. Het onderzoek zal zich daarom naast het onderzoek naar de reparatiemethoden ook toespitsen op de meest voorkomende locaties van de problemen. Dit is uiteraard wenselijk omdat hierbij de meest efficiënte oplossingsstrategie kan worden gekozen.

Allereerst is een mindmap gemaakt om de verschillende mogelijke problemen te analyseren. Deze mogelijke problemen en oplossingsrichtingen worden vervolgens onderzocht om hierover meer inzicht te krijgen. Met de ingewonnen informatie zal een gedetailleerde probleemanalyse plaatsvindenn om tot een inzichtelijke probleemstelling te komen. Uiteindelijk worden hiervoor verschillende oplossingsrichtingen gezocht en kan een aanbeveling voor verbetering worden gedaan.



Figuur 3 Oplossingsstrategie mindmap

Het probleem kan op 2 verschillende manieren worden aangepakt. Er kan worden gekeken naar de constructie waar het spoor zich op bevindt of naar reparatiemethoden die worden gebruikt om de reparaties uit te voeren. Aangezien het Bacheloreindwerk wordt gedaan in de richting van Structural Engineering en de voorkennis uit de bachelor Civiele Techniek hierin een betere basis vormt zal hoofdzakelijk worden gekeken naar constructieve toepassingen. De reparatiewerkzaamheden zullen in een later stadium gebruikt worden om een eventuele aangepaste constructie te testen.

De constructieproblemen die in eerste instantie onderzocht dienen te worden zijn de bovenbouw en de lasverbinding. Omdat de verwachting is dat een lasverbinding een zwakke plek vormt wordt gekeken naar de lasverbindingen zelf en de ruimte rondom de lasverbinding. De problemen die hier voorkomen worden besproken onderzocht.

3 Literatuuronderzoek spoorwegconstructies

Bij spoorconstructies worden vele verschillende types gebruikt ieder met eigen kwaliteiten voor verschillende eisen en randvoorwaarden. Hierbij wordt zowel gekeken naar de bovenbouw van de spoorconstructie als naar verbindende constructies oftewel lasverbindingen. De combinatie van beide constructies geeft verschillende mogelijkheden om de spoorstaaf op de juiste plek te houden. Hieronder zullen de verschillende constructies worden uitgezocht om inzicht te krijgen in de diverse toegepaste methoden. Dit kan in een later stadium gebruikt worden om een zo goed mogelijk ontwerp van een alternatieve constructievorm te maken.

Er wordt een splitsing gemaakt in de verschillende voorkomende spoorwegconstructies om de voor en nadelen van de constructies af te wegen. Hierbij wordt gekeken naar verschillende bovenbouw constructies en naar verschillende types van lasverbindingen.

De informatie is volledig gebaseerd op het dictaat Geometrisch en Constructief Ontwerp van Wegen en Spoorwegen [1].

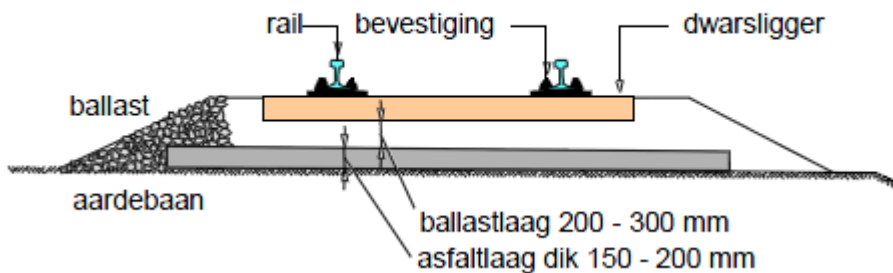
3.1 Bovenbouw constructies

Een bovenbouwconstructie zijn alle constructie elementen die zorgen voor het dragen van de spoorstaaf. De elementen moeten zorgen voor voldoende sterkte en stijfheid, maar daarnaast ook voldoende elasticiteit bieden. Er zijn verschillende systemen die elk verschillende voor en nadelen hebben, deze worden besproken per constructietype.

3.1.1 Ballastspoor

Ballastspoor is de meest voorkomende techniek voor spoorwegconstructies. De opbouw van de constructie is weergegeven in Figuur 4. Het is een klassieke methode die relatief goedkoop kan worden uitgevoerd, maar vaak onderhoud nodig heeft. Het voordeel is echter weer dat dit onderhoud in de meest gevallen vrij eenvoudig en snel kan worden uitgevoerd. Dit leidt ertoe dat klassiek ballastspoor relatief vaak zal moeten worden onderhouden, maar dat de sluiting van de spoorweg dus niet lang duurt. Daarnaast heeft een ballastbed een hoog eigen gewicht, waardoor een extra grote statische belasting op de ondergrond werkt. Zeker voor op bruggen is dit dus een minder aantrekkelijke optie.

In Tabel 1 staan de voor- en nadelen van ballastspoor opgenoemd zoals beschreven is in het dictaat [1].



Figuur 4 Klassiek ballastspoor

BALLASTSPOOR		
VOORDELEN	NADELEN	VARIANTEN
<ul style="list-style-type: none"> • relatief eenvoudige aanleg tegen lage kosten • relatief eenvoudige correctie van de spoorligging; • grote elasticiteit • goede demping van geluid en trillingen; • goede drainage van hemel- en smeltwater; • vervanging onderdelen relatief eenvoudig; • geringe tracé-wijzigingen goed mogelijk. 	<ul style="list-style-type: none"> • onderhoudsgevoelig (dus lage beschikbaarheid en hoge kosten) spoorverbinding en meer overlast) • geen constructieve fixering van het spoorframe ('zwemmen') • beperkte zijdelingse weerstand in bogen (mogelijk instabiliteit) • grote constructiehoogte (gevolgen voor tunneldiameters en lengte hellingen) • hoog eigengewicht ballast (kostenverhoging bij bruggen en viadukten) • afname doorlatendheid ballastbed door vervuiling; • vergruizen en opwerpen van ballast bij hoge snelheden, (schade aan spoorstaven) • op kunstwerken ballastmatten nodig 	<ul style="list-style-type: none"> • klassiek ballastspoor • ballastspoor op kunstwerken • asfalt in de spoorbaan • ballastmatten • dwarsliggeromhulling in ballastbed

Tabel 1 Voor/nadelen Ballastspoor [1]

3.1.2 Directe bevestiging

Bij directe bevestiging wordt de spoorstaaf direct op het kunstwerk gefixeerd. Dit werd onder andere toegepast op het oude spoorviaduct in Delft, weergegeven in Figuur 5. Het voordeel hiervan is dat er geen zwaar ballastbed noodzakelijk is. Echter moet hierdoor op een andere manier worden voldaan aan de benodigde elasticiteit en demping. Dit kan worden verkregen door de spoorstaaf te bevestigen op een laag van elastisch kurkrubber. Met deze constructie is minder statische belasting nodig en is een lagere constructiehoogte uitvoerbaar. Ook reparatiewerkzaamheden aan de spoorstaaf zijn goed uitvoerbaar.



Figuur 5 Directe bevestiging op spoorviaduct Delft

3.1.3 Prefab platenspoor

Bij platenspoor worden geprefabriceerde betonplaten toegepast waar bovenop door middel van een elastische bevestiging de spoorstaven worden bevestigd zoals zichtbaar is in Figuur 6. Het is een dure methode van spoorbouw en daarnaast levert het relatief veel trilling en geluidshinder. Wel zijn reparatiewerkzaamheden aan de spoorstaaf goed uitvoerbaar doordat de bevestigingen gemakkelijker bereikbaar zijn.



Figuur 6 Prefab Platenspoor

3.1.4 Ingestorte dwarsliggersystemen

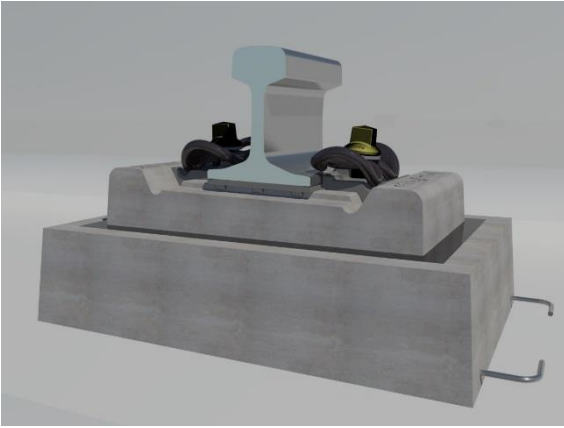
Ook wel bekend als het Rheda systeem. Hierbij worden de spoorstaven bevestigd op betonnen dwarsliggers welke vervolgens worden ingegoten in beton, zie Figuur 7. Hierdoor ontstaat over grote lengte een massieve betonnen plaat. Ook dit is een relatief dure constructiemethode en daarnaast vanwege het vele beton dat wordt gebruikt ook erg zwaar. Hierdoor is het systeem niet geschikt om te worden toegepast op een spoorbrug.



Figuur 7 Ingestorte dwarsliggersysteem

3.1.5 Elastisch ingegoten dwarsligger of blokkenspoor

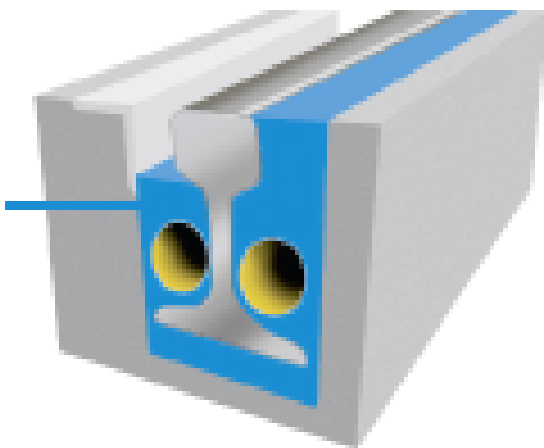
Bij deze methode worden de spoorstaven bevestigd op betonnen dwarsliggers. De dwarsliggers worden vervolgens in uitsparingen in het beton op het kunstwerk geplaatst waarna ze worden ingegoten in een vloeibare elastische massa, die daarna uithardt. Dit is zichtbaar in Figuur 8. Het voordeel is dat de spoorstaaf zeer elastisch is opgelegd waardoor trillingen en geluidshinder worden geminimaliseerd. Toch zijn reparaties aan de spoorstaaf goed uitvoerbaar.



Figuur 8 Elastisch ingegoten blokkenspoor

3.1.6 Elastisch ingegoten spoorstaaf

Bij een elastisch ingegoten spoorstaaf wordt de spoorstaaf in een uitgespaarde goot in de beton of staalconstructie geplaatst en ingegoten in een elastisch kurkrubber mengsel. De constructie is zichtbaar in Figuur 9. Deze constructiemethode staat ook bekend als embedded rail en is een zeer moderne toepassing in de railbouw. De methode is zeer aantrekkelijk omdat op een solide manier de gehele spoorstaaf continu elastisch wordt ondersteund. De rail zit niet verankerd aan de constructie waardoor de trillings- en geluidsisolatie zeer goed is. Daarnaast is de constructie waterdicht en elektrisch isolerend waardoor de spoorstaaf in zeer goede conditie blijft. De constructie is daardoor erg onderhoudsarm. Het nadeel van deze constructie is echter dat indien er toch onderhoud nodig is, dit moeilijk uitvoerbaar is.



Figuur 9 Elastisch ingegoten spoor

3.2 Lasverbindingen

Een lasverbinding is een constructiemiddel om 2 spoorstaven met elkaar te verbinden. Op deze manier worden alle spoorstaven in een traject verbonden om een volledig spoor te vormen. Er zijn verschillende lastechnieken die zullen worden besproken.

3.2.1 Thermietlassen

Thermietlassen is een metallurgische las, waarbij gesmolten 2 spoorstaven door middel van gesmolten staal worden verbonden. De spoorstaven die moeten worden verbonden worden op een afstand van ongeveer 30mm van elkaar geplaatst. Vervolgens worden de spoorstaven enkele millimeters omhooggetild om een voorhoog aan te brengen. Deze voorhoog zal bij het afkoelen van de las weer verdwijnen doordat de kop van de spoorstaaf zal krimpen. Bij een goed aangelegde voorhoog zal de rail daarna weer precies recht uitlijnen, indien de voorhoog te klein is aangebracht zal een kuil in de rail ontstaan. Als er een kuil in

de spoorstaaf zit, zal de trein hier met grote klappen overheen rijden, waardoor grote schade kan ontstaan aan de spoorstaaf.

Als de voorboog is aangebracht wordt een mal aangebracht om de spoorstaven en de thermietpot wordt hier bovenop geplaatst. Door een exotherme reactie van ijzer(III)oxide en aluminiumpoeder in de thermietpot loopt de temperatuur op tot ruim 2500°C. Hierdoor vormt zich vloeibaar ijzer wat uit de thermietpot stroomt en in de mal terecht komt. Het vloeibare ijzer stolt en verbindt de 2 spoorstaven. Na het uitharden moet de spoorstaaf worden bijgeslepen en vormt zich een voegloze verbinding.

Voor het uitvoeren van een thermietlas is voldoende werkruimte nodig om de las perfect te kunnen maken. De spoorstaaf moet kunnen worden losgemaakt om de voorboog aan te brengen en er moet voldoende ruimte zijn voor de mallen en de thermietpot. Daarnaast moet de rest van de brugconstructie beschermd worden tegen het hete staal dat bij doorlekken grote stukken staalconstructie kan wegsmelten of op onderdoor varende schepen terecht kan komen. Er dient dus ook voldoende ruimte te zijn voor het beschermen van de omgeving van de laslocatie.

3.2.2 Bekistlassen

Bekistlassen is een proces van lassen waarbij de spoorstaven worden verbonden door middel van elektroden en een lastransformator. De bekistlas wordt uitgevoerd als er onvoldoende ruimte is om een thermietlas op te stellen. De bekistlas wordt gemaakt door rupsen te lassen tussen de twee spoorstaven, dit is een erg intensieve lasmethode. De bekistlas is veiliger uitvoerbaar dan een thermietlas, maar het proces is moeilijker en hiervoor zijn beter gekwalificeerde lasers nodig. Daarnaast is de kwaliteit van een bekistlassen altijd minder sterk dan een thermietlas en komen constructiefouten relatief vaak voor.

3.2.3 Stomplassen / Afbrandstuiklassen

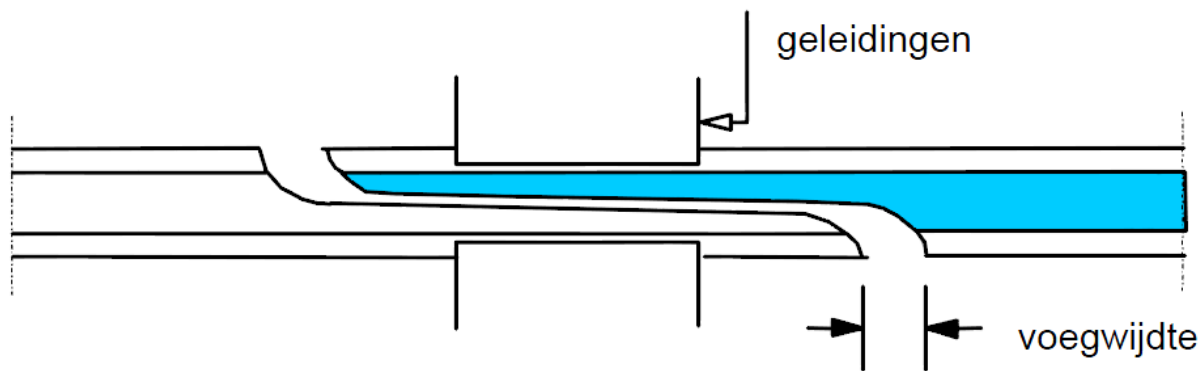
Stomplassen is een methode van lassen waarbij de spoorstaven worden verhit door een hoge elektrische wisselstroom door het material te laten lopen. Als de uiteindes deegachtig zijn geworden door de hitte, worden ze onder hoge druk tegen elkaar geduwd. Voor deze techniek is een hoop specialistische apparatuur en veel werkruimte benodigd. Het wordt daarom vrijwel alleen uitgevoerd bij gloednieuwe spoordelen die in een fabriek worden gelast, of bij de aanleg van een groot nieuw traject zodat vele lassen achter elkaar gemaakt kunnen worden. Na het lassen moet de spoorstaaf rondom geslepen worden. De kwaliteit van stomplassen is het hoogste wat er bereikbaar is bij het lassen van spoorstaven. Het is echter moeilijk om dit proces uitvoerbaar te maken bij reparaties op een brug of met reeds bevestigde spoorstaven omdat hiervoor te weinig werkruimte is.

3.3 Overige relevante spoorelementen

In het spoor komen nog vele andere constructies voor om bepaalde kwaliteiten te bewerkstelligen. Hiervan zijn compensatieinrichtingen en pockets interessant voor het onderzoek. Deze zullen daarom kort worden behandeld.

3.3.1 Compensatieinrichtingen

De compensatieinrichtingen zijn aansluitingen van de spoorstaaf waar ruimte tussen de 2 verschillende spoorstaven vrij wordt gelaten voor uitzetting en krimp van de spoorstaven door bewegingen in de bruggen, maar voornamelijk voor temperatuurverschillen. Aangezien compensatie inrichtingen kwetsbare onderdelen zijn en een kortere levensduur hebben, bevinden zich enkele meters voor en na een compensatie inrichting pockets zodat deze eenvoudiger vervangen kunnen worden. Hiervoor wordt in het midden van de pockets de spoorstaaf doormidden gezaagd en kan de compensatie inrichting worden vervangen. Vervolgens wordt de nieuwe compensatieinrichting geplaatst en met thermietlassen verbonden aan de oude spoorstaaf.



Figuur 10 Compensatieinrichting

3.3.2 Pockets

Pockets zijn open delen in een spoorconstructie die ruimte overlaten zodat de spoorstaaf op deze plekken geïnspecteerd kan worden en op deze plek doorgezaagd kan worden om delen van de spoorstaaf te vervangen. Op de plek van een pocket is de spoorstaaf niet ingegoten en hangt deze zwevend in de lucht.



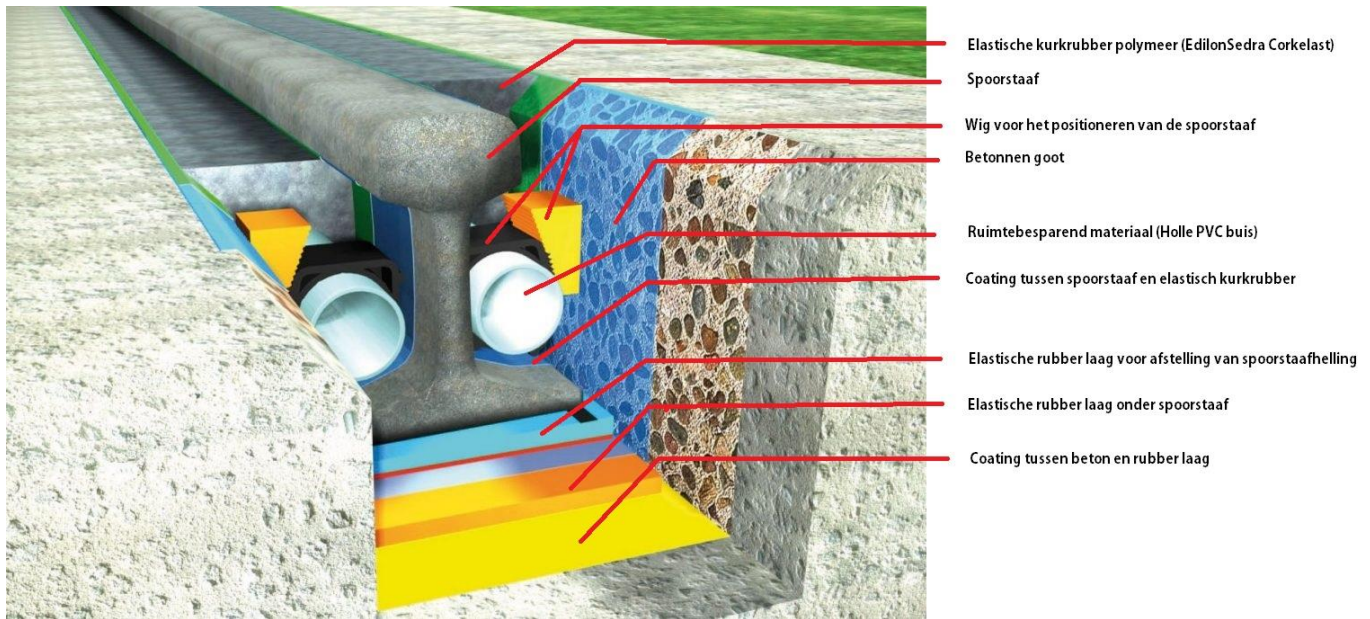
Figuur 11 Pocket op Moerdijkbrug

3.4 Vervolg van het onderzoek

Het onderzoek naar verschillende spoorconstructies was zeer relevant voor het inzichtelijk krijgen van de mogelijkheden in de railbouw. Daarnaast heeft het veel inzicht gegeven in de kwaliteitseisen die worden verwacht van spoorconstructies. Vervolgens zal het ingegoten spoor beter worden onderzocht aangezien het in dit onderzoek het belangrijkste is. Bij het ingegoten spoor al beter worden gekeken naar de voor en nadelen en zal onderzocht worden welke problematiek hier voorkomt.

4 Elastisch ingegoten spoorstaaf constructie

Aangezien op de spoorbruggen momenteel gebruik wordt gemaakt van een elastisch ingegoten spoorstaaf constructie zal dit spoorstelsel uitgebreider worden onderzocht.



Figuur 12 Edilon)(Sedra ERS (Corkelast)

Zoals in Figuur 12 is weergegeven is zichtbaar welke materialen er rondom de spoorstaaf geplaatst worden. Het is duidelijk te zien dat de spoorstaaf volledig is ingebouwd waardoor deze zowel voor horizontale als verticale krachten is ondersteund. Dit levert daardoor ook een zeer goede moment en torsie bevestiging.

Echter is ook duidelijk dat er geen ruimte is voor onderhoud aan de spoorstaaf. Daarom dat het noodzakelijk is om te weten of er bij de spoorstaaf constructieve problemen kunnen ontstaan ter plaatse van de ingieting of dat dit enkel en alleen gebeurt op plaatsen waarop gedeeltelijk de ingieting ontbreekt. Uit de praktijk is gebleken dat deze manier van spoorstaafbevestiging een zeer effectieve is. Het zorgt voor een vrijwel onderhoudsvrije constructie. Dit wordt gerealiseerd door verschillende kwalitatieve aspecten van de bevestigingsmethode. De kwaliteiten van het ingegoten spoorstelsel zijn onder andere getest en beschreven door onderzoekers aan de Budapest University of Technology. [2]

In verband met praktische redenen zoals fabricage en vervoer komen de verschillende spoorstaaf elementen in kortere stukken aan op de bouwplaats en worden vervolgens aan elkaar gelast. Volgens [3] en zichtbaar in Tabel 2 zijn er verschillende gangbare lengtes voor spoorstaven, maar kunnen spoorstaven die met een vrachtwagen worden geleverd een maximale lengte van 36 meter hebben, indien spoorstaven via railvervoer kunnen worden geleverd zijn spoorstaven tot 120 meter lengte mogelijk. Vandaar dat op de bruggen de spoorstaven ter plekke aan elkaar worden gelast. Op de plekken van de lassen komen naar verwachting de meeste constructieve problemen voor. Dit komt omdat de lasverbinding in de praktijk altijd iets minder sterk zal zijn dan de spoorstaaf zelf en vanwege de uitvoeringsproblematiek. Daarnaast is ongeveer een halve meter rondom de lasverbinding de spoorstaaf in geen enkele richting gesteund, waardoor extra grote krachten en momenten in de spoorstaaf voorkomen.

Aantal sps per systeem *	360 meter	180 meter	120 meter
Robel 360 meter	24	48	72
Robel 180 meter		24	24
Robel 120 meter			24
OVI-lightrail			24

Tabel 2 Laad en losmogelijkheden spoorstaven, Railpro

Zoals zichtbaar is in Bijlage voegloos spoor op continue elastische ondersteuning) zichtbaar is, komt rondom het wielcontact van de trein een grote verandering van de kracht voor. De rail zal deze plotselinge verandering moeten kunnen weerstaan waardoor veel kracht op de spoorstaaf komt. Indien de spoorstaaf op deze plek een slechte verbinding heeft kan dit voor problemen zorgen.

Het ingegoten spoor heeft bewezen om over de jaren heen kostenbesparend te zijn ten opzichte van klassiek ballastspoor. In het onderzoek van Arjen Zoeteman en Coenraad Esveld naar de Life Cycle Analysis van ingegoten spoor worden verschillende ingegoten spoorssystemen onderzocht. De conclusie van het onderzoek is dat ERS een investering kost die ongeveer 40% hoger ligt dan ballastspoor, maar door veel lagere onderhoudskosten over de totale levensduur wel 20% goedkoper is. De levensduur van ingegoten spoor is ongeveer 20 jaar. Dit maakt duidelijk dat ingegoten spoor een heel interessant spoorstelsel is om te gebruiken, ondanks de kleine reparatieproblemen die nu af en toe optreden. Vandaar dat het goed is om deze problemen te verhelpen en het ingegoten spoorstelsel verder te ontwikkelen.

Het uitgewerkte product, Embedded Rail System van EdilonSedra is ontwikkeld omdat het op diverse gebieden hoge kwaliteiten levert ten opzichte van klassiek ballastspoor. Deze kwaliteiten worden besproken in de uitleg over de verschillende spoorssystemen hoofdstuk Literatuuronderzoek spoorwegconstructies en [2] welke is bijgevoegd in bijlage 11.3. Het onderzoek is echter om uit te vinden waar de zwakke plekken zich bevinden in het ontwerp en zodoende deze te kunnen verbeteren. Daarom is in gesprek met Amy de Man van het bedrijf Edilon)(Sedra op zoek gegaan naar verschillende problemen dit is toegevoegd in bijlage 11.1.

Uit de praktijk is gebleken dat een ingegoten spoorstaaf zeer goed beschermd is tegen invloeden van buiten en dat het een uitstekende elastische oplegging biedt die over de gehele lengte gelijkmatig de krachten verdeelt. Precies zoals in de theorie van het ontwerp naar voren komt heeft het systeem hierdoor een zeer lange levensduur.

Echter komen er wel degelijk problemen voor op andere spoortrajecten. Uit praktijkervaringen blijkt echter dat het probleem nauwelijks optreedt bij het ingegoten spoor, maar op de plekken waar dit ingegoten spoor ontbreekt. Beter gezegd op plekken waar een pocket zit in de spoorconstructie. Het is daarom te verwachten dat juist op deze plekken de kracht in de spoorstaaf zeer toeneemt vanwege het ontbreken van een verbinding. Indien hier een zwakke plek in de spoorstaaf samenkomt met een pocket kan de extra hoge belasting op de spoorstaaf voor constructieve problemen zorgen.

Een ingegoten spoorconstructie waar nauwelijks pockets voorkomen is bij de metro in Madrid. Hier is een spoorstaaf ingegoten in een betonnen goot, waardoor deze over de gehele lengte elastisch is ondersteund. Zoals in de praktijk bewezen is in het spoor van de metro van Madrid, waarbij een levensduur van 20 jaar werd gehaald. Gedurende deze 20 jaar heeft geen enkel onderhoud plaats hoeven vinden aan de bovenbouw van het spoor. Natuurlijk is deze constructie niet volledig vergelijkbaar met een constructie op een stalen spoorbrug. Dit komt omdat hier een betonnen fundering werd gebruikt in plaats van een stalen brugdek, maar onder omstandigheden met een goede fundering is bewezen dat het ingegoten spoor uitstekend functioneert.

5 Optredende problemen bij ingegoten spoor op spoorbruggen

Om tot een goede oplossingstrategie te komen is het belangrijk om het probleem goed te analyseren. Daarom is het belangrijk om uit te vinden waar de problemen ontstaan en door welke redenen deze ontstaan. Uit het voorgaande onderzoek is gebleken dat de probleemgebieden voornamelijk voorkomen op 2 specifieke plekken. Dat is vlak naast of op een lasverbinding, maar kan ook optreden op plekken waar het spoor zweeft. Daarnaast is een probleem dat bij normale schadegevallen de spoorstaaf voor veel grotere delen moet worden vervangen dan dat bij andere bevestigingen wordt gedaan. Daarom zullen we hieronder voor de 3 verschillende probleemsituaties het probleem toelichten.

5.1 Lasverbindingen

Op de spoorbruggen worden 2 verschillende types lassen toegepast. Dit zijn thermietlassen en bekistlassen. Daarnaast worden ook stomplassen toegepast, maar deze worden niet op de brug vervaardigd en zijn dus niet van toepassing op dit probleem.

Lasverbindingen zouden in de theorie minimaal 90% van de sterkte van een normale spoorstaaf moeten hebben. In de theorie lijkt het dus dat er niet extreem grote problemen rondom de las zal voorkomen. Echter is dit percentage gebaseerd op optimaal uitgevoerde thermietlassen, waarbij de vraag heerst of dit ook haalbaar is in de praktijk. Er zijn meerdere problemen die voorkomen bij de vervaardiging van de lasverbindingen op de spoorbrug.



Figuur 13 Lasverbinding in pocket

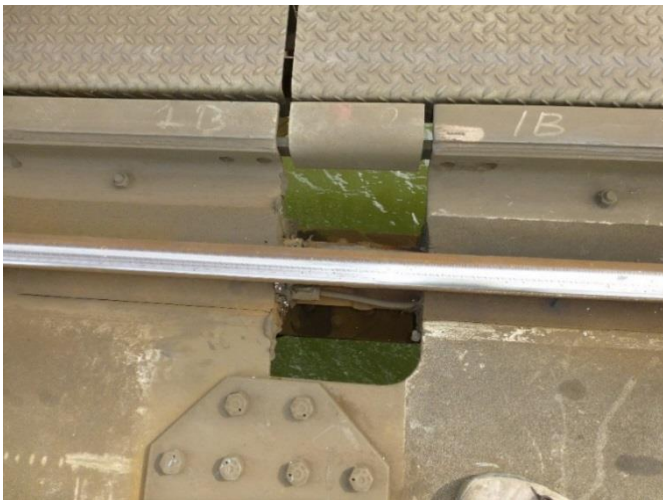
Allereerst is er op de spoorbrug heel weinig ruimte om een lasverbinding te maken indien een spoorstaaf vervangen wordt en een nieuwe spoorstaaf aan een oude spoorstaaf moet worden bevestigd. De lasverbinding zal dan tot stand moeten komen op de ruimte tussen twee brugdekken of in de uitgespaarde ruimte in de goot. Zoals in de foto zichtbaar is, is de ruimte op deze plek heel erg klein met ongeveer 30cm tussen de 2 brugdekken. De kleine ruimte zorgt ervoor dat de kwaliteit van de las drastisch daalt, dit heeft grofweg 2 oorzaken. Uiteraard is er voor het correct in positie brengen van de mallen en de thermietlas apparatuur ruimte nodig, waardoor het voor het laspersoneel lastig wordt om een perfecte las te maken. Daarnaast is er onvoldoende ruimte aanwezig om een goede voorboog te maken. De voorboog is nodig om ervoor te zorgen dat de rail na het afkoelen nog in het juiste alignment ligt. Om een goede voorboog aan te brengen is het noodzakelijk dat de spoorstaaf over 50cm verticaal te kunnen bewegen. Bij een klassieke bevestiging kan een klem los worden gemaakt om dit te bereiken, echter kan de ingieting niet tijdelijk worden verwijderd. Omdat er tegenwoordig toch lasverbindingen worden gemaakt zonder voldoende voorboog aan te brengen, ontstaan kuilen in het alignment van het spoor. Door de kuilen slaan de wielen van een trein op de lasverbinding waardoor veel schade kan ontstaan. Om een goede lasverbinding te maken is dus meer ruimte nodig dan er momenteel op de brug aanwezig is.

Bij voorkeur wordt er gebruik gemaakt van thermietlassen om reparaties aan het spoor uit te voeren. Echter wordt op bruggen vaker gebruik gemaakt van bekistlassen. Dit gebeurt omdat er bij bekistlassen een minder grote voorboog hoeft worden aangebracht, omdat de spoorstaaf minder zal krimpen ten opzichte van een thermietlas, hiervoor is dus minder ruimte nodig. Daarnaast is het gebruik van thermiet een

gevaarlijke operatie waarbij gloeiendheet staal de overige brugconstructie kan beschadigen of in de scheepvaartroute kan vallen. Naast het feit dat bekistlassen kwalitatief minder goed zijn dan thermietlassen, zorgt het ruimtegebrek voor een lastige werklocatie voor het laspersoneel. Al deze problemen komen samen met het feit dat het uitvoeren van laswerkzaamheden vrijwel altijd 's nachts plaatsvindt, onder hoge tijdsdruk en regelmatig slechte weersomstandigheden. Hierdoor wordt de laskwaliteit slechter dan mogelijk is en daardoor komen lasproblemen regelmatig voor. Informatie over lassen komt voort uit modelinge gesprekken met ir. Ruud van Bezooijen van ingenieursbureau Id² en richtlijnen voor lassen van [4].

5.2 Zwevend spoor

Zoals eerder vermeld is de belangrijkste kwaliteit van de constructie van ingegoten spoor, dat de krachten in de spoorstaaf zoveel mogelijk evenredig worden verdeeld naar de onderconstructie. De krachten worden gedempt en verdeeld, waardoor er weinig buigspanningen in de spoorstaaf optreden. Echter zijn er ook open plekken, de pockets in de bovenbouwconstructie. Op deze plekken zweeft het spoor tussen twee ingegoten delen en moeten de krachten van de treinen door de spoorstaaf worden opgevangen.



Figuur 14 Zwevend spoor in pocket

De kracht die op de spoorstaaf komt wordt daardoor voornamelijk door buiging afgevoerd naar de opleggingen. Hierdoor ontstaan grote spanningen en een zakking in de spoorstaaf. Aangezien de buiging van de spoorstaaf alleen voorkomt op de zwevende delen en nauwelijks op de ingegoten of ondersteunde delen vormt zich als het ware een kuil in het alignment. Door deze kuil komt een trein met een klap over de verbinding, hierdoor komen extra slagen op dit deel van het de spoorstaaf voor. Deze slagen zorgen samen met de extra buiging voor een verhoging van de krachten in de spoorstaaf.

5.3 Tijdsintensieve vervanging spoor

Het derde probleem bij ingegoten spoor op de spoorbrug is de arbeidsintensieve en langdurige vervanging van de spoorstaaf. Bij een reparatie dient in de meeste gevallen de spoorstaaf over de volledige ingegoten lengte te worden verwijderd. Deze lengtes kunnen op de brug oplopen tot 150 meter, waardoor een reparatie erg kostbaar en tijdsintensief is. Indien de afstanden tussen de pockets in de goot kleiner gemaakt kunnen worden, dan zullen de vervangingen over kortere lengtes uitgevoerd hoeven te worden. Hierdoor zal uiteraard de lengte van de buitendienststelling verkort kunnen worden en zal het gebruikte materiaal afnemen, waardoor kosten bespaard worden. Het zou dus interessant kunnen zijn om de hoeveelheid van de pockets te vergroten en daarmee de vervangingslengte te verkleinen.

Een andere oorzaak van de langdurige reparatie is dat het hele proces van vervanging veel tijd kost. Het proces bestaat uit het afzagen van de spoorstaaf in de pocket aan weerszijden van het probleem. Vervolgens moet de spoorstaaf met een mes uit de goot worden losgesneden en uit de goot worden losgetrokken. Dan moet de goot worden schoongemaakt en opnieuw worden behandeld met een hechtprimer. Vervolgens kan de nieuwe spoorstaaf worden geplaatst en worden vastgelast aan de oude spoorstaven. Na het lassen dient de spoorstaaf af te koelen en kan deze geslepen worden. Als de

spoorstaaf het juiste profiel heeft, kan de ingietmassa worden gestort, waarna deze massa voor ten minste 4 uur moet uitharden. Hierna kunnen de eerste treinen (met een verlaagde snelheid) het spoor weer gebruiken. Het proces bestaat uit vele stappen die elkaar opvolgen en overal bevindt zich een risico op vertraging. Het is daardoor momenteel niet mogelijk om dit gehele proces uit te voeren binnen een standaard nachtelijke buitendienststelling van 4 uur. Alleen het uitharden van de gietmassa duurt momenteel al langer. Gemiddeld is het in de praktijk haalbaar om een standaard spoorvervangingsuitvoering uit te voeren rond de 8 uur. Echter is dit nu eenmaal langer dan dat er wenselijk is. Het zou daarom zeer interessant kunnen zijn om op zoek te gaan naar mogelijkheden om de ingieting te kunnen bewerkstelligen met een kortere uithardtijd.

5.4 Conclusie probleemanalyse

Concluderend op de analyse bestaat het probleem eenvoudig gezegd uit 2 kernpunten. Allereerst heeft het spoor een zwakke plek die voorkomt op de plek van de pocket en vlak naast de las. En ten tweede duurt de vervanging van het spoor ruim 2 keer zo lang als wenselijk is om de reparatie binnen een standaard nachtelijk buitendienststelling uit te kunnen voeren.

Het eerste probleem, de zwakke plek in de spoorconstructie bestaat uit zowel de lasverbinding als het zwevende spoor in de pocket. Beide oorzaken van het relatief kwetsbare spoor komen samen op hetzelfde punt. Indien een lasverbinding wordt aangebracht bevindt deze zich bijna altijd in het midden van de pocket. Juist op deze plek komen de twee zwakke punten in de constructie bij elkaar, waardoor ze elkaar versterken. De constructie wordt hierdoor nog zwakker en problemen rondom de lasverbinding komen dus regelmatig voor. Het is daarom zeer waarschijnlijk rendabel om op zoek te gaan naar een manier waarop de lasverbindingen verticaal ondersteund kunnen worden. Op deze manier is de verbinding minder kwetsbaar en zal deze een langere levensduur hebben.

Het is bij ingegoten spoor momenteel nog niet mogelijk om een reparatie uit te voeren zonder de spoorstaaf over de gehele lengte te verwijderen. Daarom zal er worden gekeken naar manieren om de intensiteit van een spoorvervangingsuitvoering te verlichten. Bijvoorbeeld kunnen er meer pockets worden gemaakt om op deze manier de lengte van de spoorvervangingsuitvoering te verkorten. Echter zorgen meer pockets voor meer zwakke plekken in de constructie, waardoor het onderhoud vaker zal optreden. Daarom is het interessant op zoek te gaan naar een manier waardoor we voldoende vrije ruimte creëren om een lasverbinding hoogwaardig tot stand te brengen, maar hier het spoor gedurende treinverkeer wel te ondersteunen en het zwevende spoor te verminderen.

De conclusie van de probleemanalyse is dus dat er op meerdere punten winst te behalen is op het gebied van ingegoten spoor op een spoorbrug. Het combineren van de verschillende verbeteringen zorgt in dit geval voor een optimaal resultaat. Vandaar dat met de verschillende problemen gezamenlijk op zoek wordt gegaan naar een integrale oplossing voor het probleem.

6 Onderzoek naar alternatieve oplossingen

Voor een verbetering in de huidige uitvoering van de spoorconstructie zijn diverse mogelijkheden die onderzocht kunnen worden. De verschillende alternatieven hebben vele verschillende kwaliteiten of bezwaren. Daarnaast is voor sommige alternatieve constructies een totaal vernieuwend brugontwerp vereist, waardoor gesteld kan worden dat dit niet realistisch is als verbetering.

Hieronder worden enkele mogelijkheden besproken die een verbetering zouden kunnen opleveren ten opzichte van de huidige constructievorm. De verschillende varianten worden kwalitatief afgewogen om tot een zo succesvol mogelijke aanbeveling te komen. Er is op verschillende gebieden naar alternatieven gezocht om een totaaloverzicht van de mogelijkheden inzichtelijk te krijgen. Deze verschillende gebieden zijn alternatieve constructies, reparatietechnieken en ondersteuning van de lasverbinding.

6.1 Constructie

6.1.1 Plastic dek met boutverbindingen

De afgelopen jaren is het onderzoek naar constructief gebruik van plastic toegenomen. Plastic zou een zeer interessante constructie kunnen vormen aangezien het materiaal door diverse moderne ontwikkelingsvormen hoge krachten kan dragen en daarnaast een zeer laag eigengewicht heeft. Hierdoor is het erg interessant om te kijken of het mogelijk is om een Plastic dek te fabriceren die de huidige stalen brugdekken kan vervangen.

Het gebruik van plastic heeft vele toekomstige voordelen ten opzichte van het gebruik van staal. Zo is plastic nauwelijks vatbaar voor invloeden van buitenaf waardoor corrosie niet voorkomt. Ook kunnen plastic constructie-elementen worden gefabriceerd van volledig gerecycled materiaal en kan het materiaal na afloop van de levensduur wederom volledig worden gerecycled, waardoor dit stukken minder verontreinigend is voor het milieu.

Plastic dekken kunnen worden uitgevoerd als prefab platen die op de brugliggers worden gemonteerd. Vervolgens kan de spoorstaaf hierop door middel van een directe bevestiging worden opgelegd. De staaf is hierdoor volledige ondersteund door het plastic in verticale richting, maar is volledige toegankelijk voor inspecties en onderhoud. Ondanks dat grote plastic platen benodigd zijn, zal het eigen gewicht van de constructie zeer laag blijven. Volgens het bedrijf Axion, producent van constructief plastic voor onder andere brugconstructies, is constructief plastic is uitvoerbaar met een eigen gewicht vanaf 850-900 kg/m³. Hierdoor is het ruim 2.7 keer lichter dan eenzelfde plaat van beton met een eigen gewicht van 2500kg/m³. Hierdoor is het gebruik van plastic brugdekken veel beter bruikbaar voor brugconstructies ten opzichte van het gebruik van beton. De informatie over plastic brugconstructies komt van de website van (Axion, <http://www.axionintl.com/composite-bridges.html>)

De plastic dek constructie is echter een zeer kostbare uitvoering, omdat het volledige brugdek moeten worden vervangen en de gehele spoorconstructie opnieuw moet worden aangelegd. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van een directe bevestiging waardoor minder volledige elastische ondersteuning wordt geboden zoals bij een ingegoten spoorstaaf. De voordelen van een elastisch ingegoten spoorstaaf zijn dermate groot, dat het wenselijk is om te kijken of een combinatie van deze 2 types interessant is voor toekomstig gebruik. Waarbij een plastic dek wordt gefabriceerd met een goot waarin de spoorstaaf kan worden ingegoten. De plastic dek constructie is echter geen oplossing voor het probleem wat ontstaat bij scheuren in de spoorstaaf op de brug.



Figuur 15 Composite brugdek van Axion Struxure

6.1.2 Elastisch ingegoten plastic dwarsliggerconstructie of plastic blokkenspoor

Een normaal elastisch ingegoten dwarsligger of blokkenspoor bestaat uit een betonnen dek met een goot waarin de betonnen dwarsliggers of blokken worden ingegoten. De voordelen van deze constructie zijn besproken in het onderzoek spoorconstructies. De nadelen zijn echter dat bij deze constructievorm zeer veel beton wordt gebruikt, waardoor de constructie veel te zwaar is om te gebruiken op een spoorbrug. Echter zijn er tegenwoordig nieuwe materialen die gelijkwaardige prestaties kunnen leveren met een veel kleiner eigen gewicht. Door gebruik te maken van dwarsliggers of blokken van versterkt plastic kunnen gelijkwaardige resultaten worden behaald.

Het gebruik van plastic dwarsliggers biedt echter nog meer voordelen. Het plastic is net zoals beton weinig gevoelig voor invloeden van buiten en heeft hierdoor een zeer lange levensduur. Het materiaal blijft hierdoor jarenlang in staat om het spoor te ondersteunen. De plastic dwarsliggers bieden voldoende sterkte en leveren meer elasticiteit dan betonnen dwarsliggers of blokken. Het materiaal is hierdoor dus uitermate geschikt om te worden toegepast op spoorbruggen. Daarnaast kunnen al uitstekend recyclebare plastics worden gefabriceerd, waardoor dit milieuvriendelijker is dan het gebruik van beton.

Uiteraard biedt deze constructievorm ook enkele nadelen. Allereerst is de spoorstaaf niet volledig elastisch ondersteund zoals bij een ingegoten spoorstaaf, waardoor meer lawaai kan voorkomen en de krachten in de spoorstaaf niet evenwichtig worden verdeeld. Echter biedt dit wel meer demping en elastische ondersteuning dan een klassiek ballastspoor. Daarnaast moet voor deze constructie wel het volledige brugdek inclusief het volledige spoor worden vervangen. Daardoor is dit een zeer dure ingreep.

De informatie over constructief plastic komt van het bedrijf Axion. (Axion, <http://www.axionintl.com/products-composite-railroad-ties.html>)



Figuur 16 Plastic dwarsliggers van Axion Ecotrax

6.2 Reparatietechnieken

6.2.1 Versnelde vervanging

Indien een spoorstaaf gerepareerd moet worden, zal het deel waar de scheur of breuk zit tussen de 2 dichtstbijzijnde pockets volledig moeten worden vervangen. Als de lengte van het deel dat vervangen moet

worden groter wordt zullen zowel de kosten als de duur van de reparatie toenemen. Daarnaast is de vervanging van het spoor een proces dat bestaat uit vele opeenvolgende stappen. De stappen dienen nauwkeurig uitgevoerd te worden, want er kunnen gemakkelijk fouten worden gemaakt.

Om het proces te kunnen versnellen zijn een aantal zaken die bij kunnen dragen aan een versnelling. Allereerst is er momenteel heel weinig ruimte om te werken rondom de lasverbinding. De spoorstaven moeten omhoog worden getrokken om een correcte voorhoog aan te brengen en de lasser moet eromheen nog kunnen werken in een kleine ruimte. Mocht er meer ruimte zijn dan zal de lasser zijn werk beter en sneller uit kunnen voeren. Daarom zou meer ruimte rondom de pocket ervoor kunnen zorgen dat het gehele proces sneller verloopt.

Daarnaast is een probleem aan het ingegoten spoor, dat de Corkelast gietmassa geruime tijd nodig heeft om volledig uit te harden.

6.3 Ondersteuning van lasverbinding

Uit het onderzoek blijkt dat de meeste problemen met ingegoten spoorstaven op stalen bruggen voorkomen bij een lasverbinding. De oorzaak hiervan zou 2 redenen kunnen hebben. Ofwel de spoorstaaf is dermate veel gevoeliger voor grote krachten op plekken waar de constructie niet volledig elastisch zit ingegoten, maar het zou ook kunnen dat de lasverbindingen in de praktijk van slechte kwaliteit zijn dan er wordt aangenomen. Om problemen rondom de lasverbindingen op te lossen zou het verstandig zijn om de lasverbinding te ondersteunen. Op deze manier is de verbinding zelf minder vatbaar voor extra buiging of extra krachten op de zwakste plek van de spoorstaaf.

Omdat de spoorstaaf rondom een las visueel inspecteerbaar moet zijn volgens de voorschriften van ProRail blijven de lasverbindingen nu zweven tussen de opleggingen. Echter zou het wellicht een betere oplossing te zijn om ter plaatse van de las te spoorstaaf te ondersteunen. Het is wenselijk om op meerdere plaatsen pockets te plaatsen om zo het eventueel benodigde onderhoud efficiënt te laten uitvoeren. Daarentegen zorgt het plaatsen van veel pockets ervoor dat er meerdere zwakke plekken in de spoorstaaf ontstaan. Daarom zullen we op zoek gaan naar een manier waarop de spoorstaaf toch ondersteund kan worden in een pocket. Dit zal gebeuren middels een demonteerbare ondersteuning.

6.3.1 Demonteerbare ondersteuning

Om de lasverbinding te ondersteunen en daarmee het zwakste punt in de spoorstaaf te verbeteren zal worden gekeken naar mogelijkheden om een demonteerbare ondersteuning te plaatsen onder de lasverbinding. Het is wenselijk om de ondersteuning te kunnen verwijderen in het geval er een inspectie of reparatie aan de spoorstaaf noodzakelijk is. Getracht wordt om de constructie zo eenvoudig mogelijk uit te voeren, waardoor het demonteren snel kan gebeuren en hiervoor nauwelijks extra tijd benodigd is in het reparatieproces.



Figuur 17 Pocket waar een lasverbinding zal worden gemaakt

Zoals in Figuur 17 is te zien bevindt de plek van de lasverbinding zich midden in de pocket en boven de draagliggers van de brug. Ergens op deze plek zal een ondersteuning dienen te komen om de spoorstaaf te dragen onder de las.

Er zijn twee mogelijkheden om een dragende constructie te maken. Er kan een stalen ligger of extra goot worden gemaakt die de twee brugdelen met elkaar verbindt. Deze kan door middel van bouten aan het brugdek worden verbonden en hierdoor de krachten overdragen.

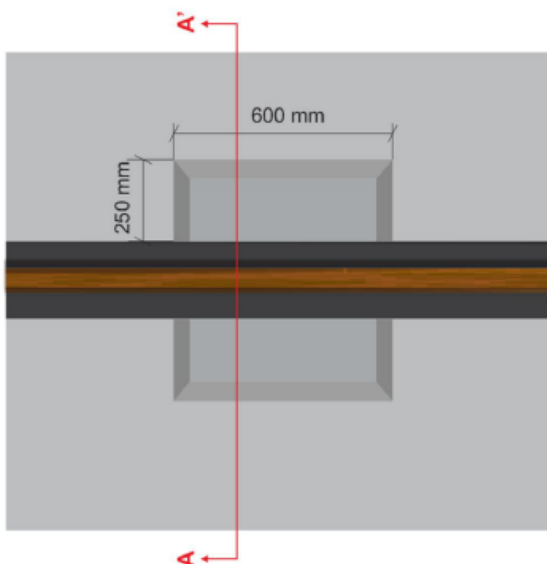
De andere mogelijkheid is door een dragend element te plaatsen die de spoorstaaf verbindt met de brugligger eronder. Hierdoor kan de kracht rechtstreeks naar de ligger worden verplaatst. Er zal dan echter wel extra rekening moeten worden gehouden met een verend element tussen het constructiedeel, aangezien anders klappen van de trein op de brugligger komen wat voor vermoeiingsproblemen kan zorgen.

6.3.2 Demonteerbare ingegoten ondersteuning

Indien bij een spoorstaaf een defect optreedt is het wenselijk om een klein deel van de spoorstaaf te vervangen door middel van 2 pockets te plaatsen op enkele meters van de scheur. Hierna kan voor dit relatief kleine stuk de spoorstaaf worden vervangen. Echter is er een minimale ruimte vereist om de spoorstaaf te kunnen doorzagen en de nieuwe las aan te brengen. Bij ingegoten spoor in een goot van beton kan relatief eenvoudig extra ruimte worden gemaakt door een uitsparing in het beton te maken. Bij een ingegoten spoor op een stalen dek is dit niet mogelijk. Vandaar dat kan worden gekeken naar een demonteerbare stalen goot waarin de extra ingieting kan worden geplaatst. Op deze manier kunnen op strategische locaties demonteerbare pockets worden gemaakt om reparatie te versnellen. Na afloop van de reparatie kan de goot worden teruggeplaatst om wederom ingegoten te worden.

Eenzelfde type systeem wordt reeds gebruikt door het bedrijf Edilon)(Sedra, echter gaat het in dit geval om een demonteerbare pockets voor een betonconstructie. Deze methode staat uitgelegd in de memo "Rail replacement in Edilon)(Sedra ERS" 2014 en de memo "Railweldings in Edilon)(Sedra ERS" 2014.

Bij het systeem van de demonteerbare pockets van Edilon)(Sedra worden in de betonplaat naast de goot ook enkele uitsparingen aangebracht. Deze uitsparingen zijn de pockets waarin de laswerkzaamheden kunnen plaatsvinden.

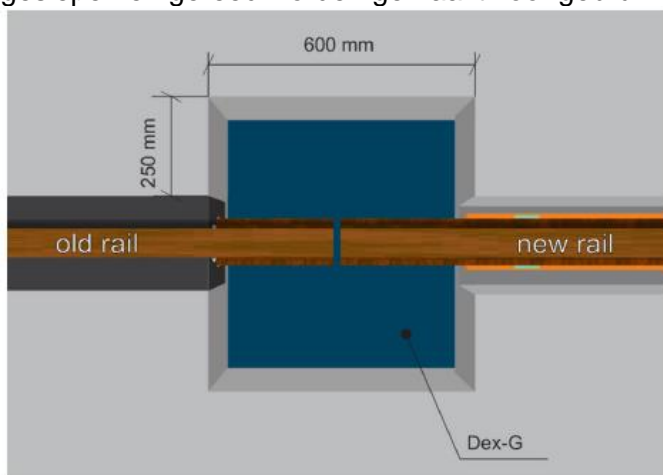


Figuur 18 Pocket voor ingegoten spoor in betonnen goot



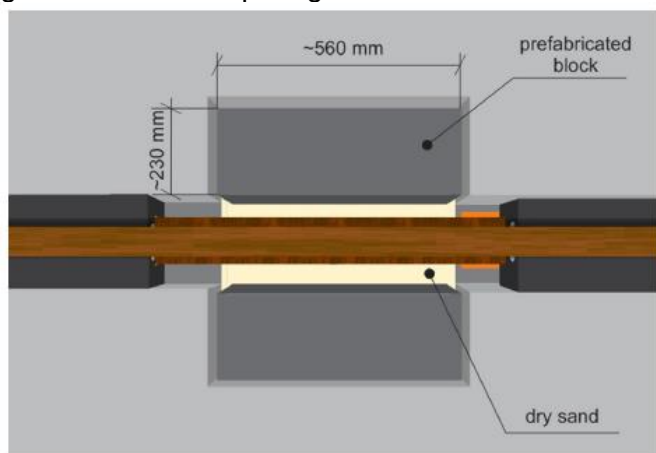
Figuur 19 Uitgespaarde ruimte in betonconstructie

De spoorstaven worden op de juiste plek in de goot geplaatst en worden ingegoten tot enkele centimeters voor het begin van de uitsparing, dit wordt gedaan om het corkelast te beschermen tegen de hoge temperaturen van het thermietlassen. In het midden van de uitsparing worden de spoorstaven aan elkaar gelast door middel van een thermietlas. Als de staven aan elkaar verbonden zijn kan de las worden geslepen en gereed worden gemaakt voor gebruik.



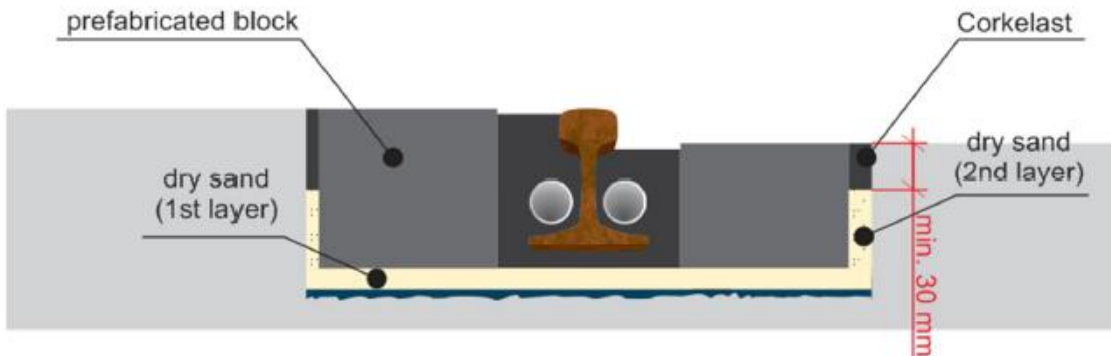
Figuur 20 nieuwe rail wordt geplaatst in de betonnen goot

Vervolgens wordt er onder de spoorstaaf een droge zandlaag gestort als een stevige basis. De uitsparingen worden opgevuld met geprefabriceerde betonblokken die iets kleiner zijn dan de uitsparing zelf. Dit wordt gedaan om de uitsparing te verdichten en de hoeveelheid gebruikt Corkelast te sparen.



Figuur 21 Las is gemaakt en de pocket wordt gevuld

De overgebleven ruimte kan nu worden ingegoten met corkelast waardoor de lasverbinding en de betonblokken rondom elastisch worden ondersteund.



Figuur 22 Doorsnede van de opgevulde pocket



Figuur 23 Afwerking van de volledig ingegoten pocket en lasverbinding

Het voordeel van dit systeem is dat dezelfde pockets eenvoudig weer kunnen worden geopend indien er een stuk spoorstaaf moet worden vervangen. Hierbij wordt met een groot mes het corkelast opgesneden en kan het betonblok worden opgetild. Vervolgens ontstaat voldoende ruimte om het overige corkelast in de pocket te verwijderen. Als de pocket geopend is dan kan de spoortaf in het midden van de pocket doormidden worden gezaagd en kan het stuk spoortaf tussen twee pockets worden vervangen.



Figuur 24 Corkelast wordt losgesneden door middel van het "pizzames", vervolgens wordt het overige corkelast verwijderd

Door de pockets op relatief korte afstand van elkaar te plaatsen hoeven per reparatie slechts korte delen spoorstaaf te worden vervangen. Hierdoor zullen de kosten voor de reparatie dalen en zal de reparatie veel sneller uitgevoerd kunnen worden waardoor het spoor minder lang gesloten hoeft te worden. Daarnaast

liggen alle lasverbindingen ingegoten en zijn dus volledige elastisch ondersteund, hierdoor kan de kracht beter worden gedistribueerd en zijn de lassen dus minder kwetsbaar voor scheuren of breuken. Het kan echter nog steeds voorkomen dat een scheur optreedt in de spoorstaaf ter plaatse van de lasverbinding, maar ook de gescheurde spoorstaaf is nu veel beter beschermd voor doorbuiging. Een normale zwevende lasverbinding verandert bij een breuk in twee uitkragingen waardoor de zakking van de spoorstaaf vele malen groter wordt. Doordat de spoorstaaf nu over de gehele lengte is gesteund zal de zakking veel kleiner zijn. Hierdoor zal uiteindelijk een reparatie wel noodzakelijk zijn, maar hoeft deze niet met spoed te worden uitgevoerd. Het repareren kan nu worden uitgesteld tot een gunstiger moment buiten de spitsijden om.

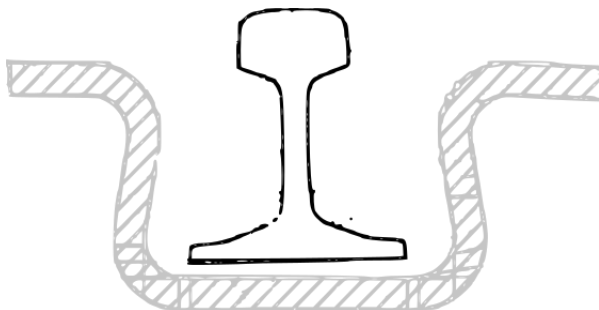
7 Ontwerp praktisch toepasbare oplossing

Vanuit de in de probleemstelling naar voren gekomen oplossingsrichtingen en de mogelijkheden voor alternatieve oplossingen wordt een ontwerp gemaakt wat toepasbaar zou kunnen zijn om uit te voeren op een spoorbrug met een ingegoten spoor. Er is gekozen om een systeem uit te werken met een demonteerbare ingegoten spoorstaaf. Omdat op deze manier de kwaliteiten van meerdere geschetste problemen integraal kunnen worden aangepakt. Het ontwerp dat wordt gemaakt is een concept van een mogelijke toepassing. Het is een eerste opzet tot ontwerpen van een toepasbaar systeem.

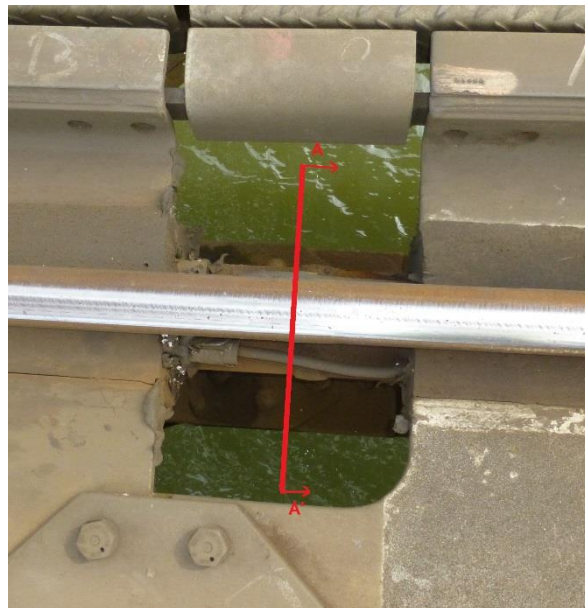
De uitgangspositie van het ontwerp was om verschillende verbeteringen in een integrale oplossing te verwerken. De volgende verbeteringen zijn vanuit de probleemanalyse naar voren gekomen om te gebruiken in het ontwerp.

- Vergroten van de pockets om werkruimte te creëren voor de volledige lasprocedure.
- Verticale ondersteuning bieden op en rondom de lasverbinding.
- De pockets demonteerbaar ondersteunen, waardoor geen zwevende delen in de spoorstaaf voorkomen, maar er wel ruimte gemaakt kan worden voor reparaties.
- Het vergroten van het aantal pockets, waardoor de vervangingslengte kan worden verkort, zonder het aantal zwakke plekken te vergroten.
- Eenvoudig systeem dat kan worden toegepast op bestaande brugconstructies.

Bij het systeem is gekozen om uit te gaan van de huidige situatie waarbij de spoorstaaf zweeft in de pocket omdat dit momenteel het geval is. Hier willen we graag een aanpassing op maken door middel van een ombouwingsysteem. In het eerste plaatje is zichtbaar hoe de spoorstaaf zich bevindt in de pocket. De goot waaruit deze spoorstaaf steekt is licht grijs zichtbaar.

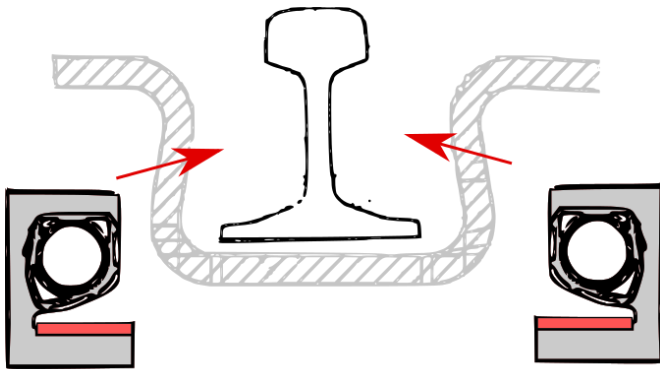


Figuur 25 Doorsnede A-A' Zwevende spoorstaaf in de pocket

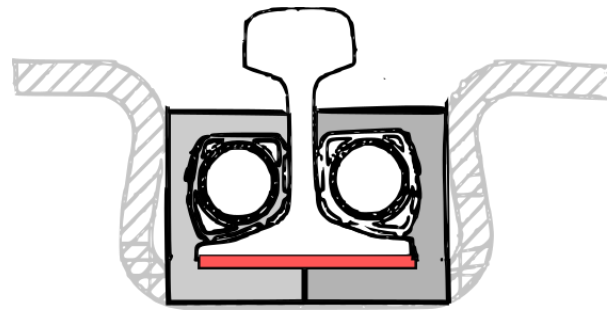


Figuur 26 Bovenaanzicht Spoorstaaf in pocket

De spoorstaaf wordt bij voorkeur ondersteund door de elastische gietmassa om zodoende over de volledige lengte een elastische ondersteuning te verkrijgen. Aangezien de gietmassa lang dient uit te harden voor een goed resultaat is gekozen om de ondersteuning te maken van prefab ingegoten delen. Deze kunnen als het ware als een mal om de spoorstaaf worden aangebracht. Het voordeel hiervan is dat er veel minder tijd benodigd is voor het drogen van het materiaal. De producten kunnen kant en klaar worden aangeleverd uit een fabriek, waar ze onder perfecte omstandigheden kunnen worden gemaakt. Vervolgens kunnen de onderdelen met een zeer dunne laag hechtingsmateriaal tussen de mal en de spoorstaaf worden vastgezet.

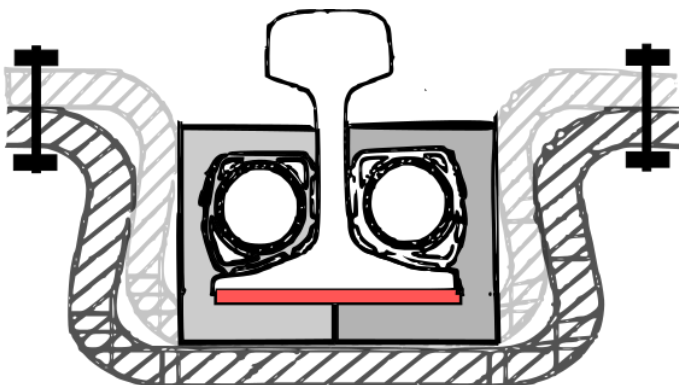


Figuur 28 De prefab kurkrubber elementen worden geplaatst



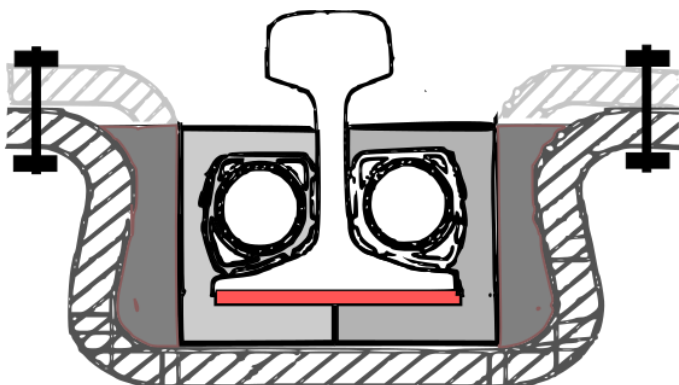
Figuur 27 De kurkrubber elementen passen precies rondom de spoorstaaf en worden met een dunne laag ERS vastgezet

Als de elementen zijn geplaatst wordt een stalen goot om het geheel geplaatst. Deze stalen goot is iets groter dan de goot die zich momenteel op de brug bevindt, waardoor deze precies rondom aansluit. De stalen goot wordt met boutverbindingen aan weerszijden bevestigd en aangedraaid. Door de bak stevig aan te draaien worden de rubber elementen licht ingedruwd en ontstaat een kleine onderdruk onder de spoorstaaf. De spoorstaaf is nu verticaal ondersteund ter plaatse van de lasverbinding.



Figuur 29 De stalen goot wordt met boutverbinding op de plek gezet

Als de goot volledig op de plek bevindt, kunnen de randen tussen de goot en de elementen worden ingegoten om een volledige afdichten te krijgen. Hierdoor kan er geen vocht of vuil in de constructie komen waardoor de levensduur wordt verlengd.

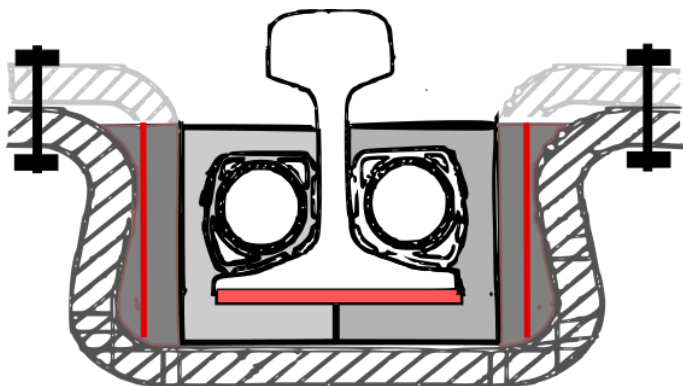


Figuur 30 Ingegoten demonteerbaar systeem

Het demonteerbare ingegoten systeem zorgt voor een elastisch ondersteunde bevestiging van de spoorstaaf over de gehele lengte van de brug. Doordat hierdoor alle zwevende spoordelen kunnen worden vervangen door demonteerbare constructies verandert de spoorbrug in een volledig elastisch ondersteunde spoorconstructie.

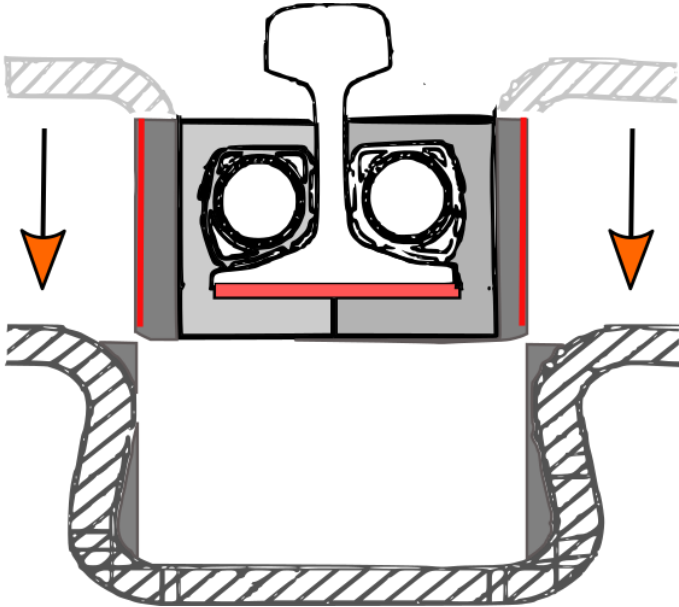
De verschillende elementen die in het demonteerbare systeem voorkomen kunnen op maat worden geprefabriceerd in een werkplaats en voorzien van de benodigde coatings. Hierdoor kan veel tijd worden bespaard gedurende de reparatie. Daarnaast zal de kwaliteit van de verbindingen verbeteren aangezien in een fabriek ideale omstandigheden kunnen worden gewaarborgt om de onderdelen te fabriceren. Misschien wel het belangrijkste aan de constructie die op deze manier wordt gerealiseerd is dat de spoorstaaf altijd volledige rondom zit bevestigd. Mocht er nu toch een defect in de spoorstaaf ontstaan, zal deze op die plek nog steeds ondersteund zitten. De spoorstaaf zal daardoor minder snel verder breken, waardoor noodreparaties minder gehaast hoeven te worden uitgevoerd. Indien een scheurtje in de spoorstaaf optreedt, zit deze nog steeds volledig verankerd, waardoor het treinverkeer niet direct stil gelegd hoeft te worden. De reparatie kan worden ingepland voor een standaard buitendienststellingsperiode.

Het systeem kan eenvoudig en snel gedemonteerd worden indien een defect in de spoorstaaf optreedt. Met een groot rond asfaltmes kan een snede worden gemaakt in het ingestorte corkelast waardoor de constructie weer los komt te liggen.



Figuur 31 Het corkelast wordt ingesneden op de rode strepen

Vervolgens kunnen de bouten worden losgedraaid en kan de demonteerbare goot eraf worden getrokken. Daarna kunnen de prefab elementen losgehaald worden en kan de spoorstaaf worden gerepareerd. Na vervanging van de spoorstaaf kan dezelfde goot worden gebruikt met nieuwe prefab corkelast elementen om de spoorstaaf weer te ondersteunen.



Figuur 32 De demonteerbare goot wordt van de spoorstaaf afgehaald

Het ontworpen systeem biedt vele voordelen ter verbetering van het huidige systeem. Op de volgende vlakken kan door gebruik te maken van dit systeem verbetering worden bereikt.

- Verbeterpunten
 - Vergroten lasruimte
 - Ondersteunen lasverbinding
 - Mogelijkheid voor meer reparatieruimtes
 - Toepasbaar op bestaande constructie
 - Gehele brug gelijkmatige ondersteuning

8 Conclusie

Het doel van dit onderzoek was om inzicht te krijgen in de problematiek die heerst bij de vervanging van ingegoten spoor op stalen spoorbruggen. Hierbij is geprobeerd eerst de problemen te herlijden tot oorzaken om zo de volledige probleemsituatie te analyseren. Met duidelijke probleemsituaties en bekende oorzaken kunnen vervolgens aanbevelingen worden gedaan om de problematiek te verminderen.

Allereerst is onderzoek gedaan naar verschillende spoorssystemen om inzicht te krijgen in de kwaliteiten en kennis op te doen over de railbouw. Vervolgens is specialitscher gekeken naar het ingegoten spoorstelsel ERS van Edilon (Sedra omdat dit het meest toegepaste ingegoten spoorstelsel op dit moment is. Uit verschillende onderzoeken, papers en praktijkervaringen van zowel ProRail, Edilon) (Sedra en Strukton Rail is gebleken dat het ERS systeem een erg goede methode is om spoor te bevestigen. Zowel in onderzoeken over de totale kosten in de levenscyclusanalyse [5] als technisch constructief in de paper elastic behaviour [2] komt naar voren dat het ingegoten spoor zeer veel potentie heeft om veelvuldiger te worden toegepast. Hierdoor kunnen we concluderen dat de problemen die hier verder worden onderzocht geen structurele problemen met het systeem zijn, maar eerder lokale problemen. We stellen daardoor dat we het ingegoten spoor willen blijven gebruiken en verder op zoek gaan naar de lokale problemen die optreden op de stalen spoorbruggen. We gaan ervan uit om het spoorstelsel in de hoofdlijnen dus niet aan te passen.

De problemen die hoofdzakelijk voorkomen zijn terug te brengen tot 3 oorzaken. Dit zijn lasverbindingen, zwevende spoordelen en de langdurige vervanginstijd.

Te concluderen valt dat de zwakke punten in de constructie vaak samen komen. Dit komt omdat een lasverbinding alleen op een zwevend spoordeel kan worden aangebracht. Op deze manier wordt de constructie op dit punt nog zwakker en komen problemen voor. Daarnaast kunnen we concluderen dat er simpelweg te weinig ruimte vrij is in de huidige pockets om een goede lasverbinding te realiseren. Naast het feit dat de las en de voorboog hierdoor van slechte kwaliteit zijn, is het vervangproces ook lastiger, waardoor dit meer tijd kost.

Er zijn meerdere mogelijke oplossingsrichtingen waardoor de reparatie van spoorstaafdefecten sneller kan verlopen.

- Allereerst zijn er de afgelopen jaren vele innovaties geweest voor het bouwen met plastic of composiet materialen. In de railbouw zijn deze technieken nog niet in grote mate toegepast al zijn er hiervoor wel mogelijkheden. Het gebruik van plastic materialen zou de klassieke railbouwelementen kunnen vervangen aangezien deze veel duurzamer en lichter uitgevoerd kunnen worden. Hierdoor is het mogelijk om technieken die normaal gesproken niet uitvoerbaar zijn op brugconstructies toch toe te passen door het gebruik van moderne materialen. Dit zou onder andere kunnen door het gebruik ingegoten plastic-blokkenspoor of een directe bevestiging op een plastic dek constructie.
- Daarnaast is te stellen dat het ingegoten spoor zelf graag gebruikt blijft worden omdat dit een uitstekende bevestiging biedt. In dat geval moeten er lokale oplossingen worden ontworpen per probleemlocatie. Het belangrijkste is in dit geval dat de ruimte rondom de pockets groter en beter bereikbaar wordt gemaakt. Hierdoor wordt de kwaliteit van de constructie beter. Het geeft wel als nadeel dat de spanningen in de spoorstaaf toenemen doordat er meer buiging op kan treden in het zwevende spoor. Hierdoor zou je de spoorstaaf verticaal willen ondersteunen op de momenten dat het spoor in gebruik is. Dit kan bereikt worden door een demonteerbare ondersteuning en deze kan eventueel ook nog worden ingegoten voor een optimaal resultaat. Omdat de constructie verschillende afmetingen heeft, is er op dit moment geen standaardoplossing te maken. Echter zouden in een herontwerp al deze pockets het beste gelijke vormen aan kunnen nemen om op deze manier een gestandaardiseerde procedure te verkrijgen.
- Een andere oplossing voor de langdurige vervanging zou het gebruik maken van geprefabriceerde Corkelast elementen. Hierdoor kunnen grote delen van de constructie worden ondersteund door het Corkelast zonder dat het materiaal lang dient uit te harden. Dit kan ervoor zorgen dat een standaard reparatie uitvoerbaar wordt binnen een standaard nachtelijk buitendienststelling, waardoor de grootste problemen worden verholpen.

8.1 Beantwoording onderzoeksvragen

Met deze volledige conclusie kunnen de aan het begin gestelde onderzoeksvragen beantwoord worden. Er waren drie deelvragen die samen de hoofdvraag kunnen beantwoorden.

- Allereerst was de vraag of er een alternatieve constructie zou kunnen komen om de hoeveelheid onderhoud te verlagen. Uit het onderzoek is gebleken dat de indien de lasverbinding versterkt kunnen worden door deze te ondersteunen, het aantal problemen aan de spoorstaaf zal afnemen. We kunnen daardoor stellen dat er alternatieve constructiemogelijkheden zijn, echter zal hiervoor een compleet ontwerp nog moeten worden gemaakt.
- De tweede deelvraag was of er een manier was om het spoor sneller te kunnen vervangen en daardoor de reparatietijd te verkorten. Door in de constructie beter rekening te houden met toekomstige reparaties, zoals meer ruimte voor de lasverbindingen en meer pockets in het spoor zal de reparatie sneller kunnen. Daarnaast zou een onderzoek naar het gebruik van prefab corkelast elementen ook voor een snellere reparatie kunnen zorgen. Er zijn dus mogelijkheden voor een snellere vervanging, maar hiervoor is op verschillende vlakken meer onderzoek nodig.
- De laatste deelvraag was of er een alternatieve reparatiemethode is waardoor het spoor bij een probleem niet hoeft te worden vervangen. Aangezien het spoor rondom over de gehele lengte ligt ingegoten is hiervoor geen mogelijkheid. Er zijn wel manieren om het spoor sneller te vervangen, maar indien een scheur of breuk optreedt in de spoorstaaf is de enige mogelijkheid om het spoor over de lengte tussen 2 pockets te vervangen.

We kunnen daarmee de hoofdvraag beantwoorden aangezien de deelvragen een duidelijk beeld schetsen. Er zijn vele verschillende mogelijkheden om de problematiek aan ingegoten spoor op spoorbruggen aan te pakken. Er zijn betere alternatieven die ervoor zorgen dat het spoor minder reparaties en reparatietijd nodig zal hebben. De verschillende alternatieven zijn uiteengezet en de meest optimale lijkt in deze fase van het onderzoek om het aantal pockets te vergroten en te ondersteunen door middel van een demonteerbaar constructiedeel. Om hiervan een praktisch functionerende constructie te maken is echter nog meer onderzoek en ontwerp nodig

9 Aanbevelingen

Gedurende dit onderzoek zijn meerdere keren aannames gedaan voor de reden van spoorstaafproblematiek. In de meeste van de gevallen is deze gebaseerd op ervaringen van uit de praktijk zoals die zijn ervaren door verschillende partijen. Er zijn interviews en gesprekken geweest met de fabrikant van het ingegoten spoorstaafstelsel Edilon (Sedra, de opdrachtgever en spoorbeheerder ProRail, de aannemer en uitvoerder van het spoorstelsel op de Moerdijkbrug Strukton Rail en met onafhankelijke deskundigen. Daarnaast zijn vele inzichten in de methodiek verkregen door standaard constructieve inzichten. Dit zorgt ervoor dat er nauwelijks testresultaten beschikbaar waren om de redeneringen te bewijzen. In het onderzoek is geprobeerd om het volledige probleem te beschouwen en uiteen te zetten. Hieruit komen dan ook vele aanbevelingen voor vervolgend onderzoek om het probleem volledig te kunnen oplossen.

9.1 Aanbevelingen voor onderzoek

Het is duidelijk geworden waar de problemen in het huidige spoorstelsel zich bevinden, echter zijn de problemen nog niet opgelost. Het is noodzakelijk voor het ontwerp van een verbetering om precieze informatie te verzamelen over de kwaliteit van de verschillende toegepaste lasmethodes. Hierbij is nu niet duidelijk of de lassen die worden uitgevoerd tijdens reparaties eenzelfde kwaliteit leveren als in de theorie zou worden aangenomen. De verwachting is dat deze stukken lager zal liggen, door verschillende factoren. Het is daarom relevant om meerdere testen uit te voeren waarbij het proces wordt getest onder vergelijkbare omstandigheden waarin laspersoneel aan het werk is. Dit kan de daadwerkelijke belangrijkste problemen aankaarten en zal aantonen hoeveel kwaliteitsverlies er is bij een lastig realiseerbare lasverbinding.

Verder is er in dit onderzoek geen aandacht geweest naar de ontwikkeling van modernere lastechnieken, waardoor de kwaliteit hoger wordt. Ook zijn er momenteel onderzoeken bezig voor het verkrijgen van hoogwaardige lassen die in een veel kleinere ruimte uitvoerbaar zijn. Het zou interessant zijn om hier meer onderzoek naar te doen, waardoor kwalitatief goede lassen wellicht in de toekomst mogelijk zijn zonder de brugconstructie hiervoor te veranderen.

Daarnaast zijn in het onderzoek verscheidene varianten belicht die de huidige spoorconstructie zouden kunnen verbeteren. Echter is het onderzoek hiernaar slechts globaal uitgevoerd en zal voor al deze constructievormen een uitgebreider onderzoek nodig zijn om de kwaliteiten aan te tonen. De technische aspecten van een constructie met plastic of composiet is niet volledig onderzocht omdat dit niet het doel was. Echter heeft het materiaal de potentie om in toekomstige railbouw projecten gebruikt te worden. Vandaar dat het gebruik van plastic als vervanging van zwaardere constructiematerialen verder dient te worden onderzocht.

In het onderzoek is een concept-ontwerp gemaakt voor een demonteerbare ondersteuning. Het ontwerp is globaal gemaakt en daarom niet voorzien van exacte maatvoering. Het zou zeer interessant zijn om dit verder te ontwerpen en in een schaalmodel te testen op haalbaarheid. De integraliteit van het een dergelijke ondersteuning heeft de potentie om vele problemen met een relatief eenvoudig ontwerp te verbeteren.

9.2 Aanbevelingen voor uitvoering

De belangrijkste aanbevelingen zijn echter kleine aanpassingen in het ontwerp van een spoorbrug indien hier gebruik zal worden gemaakt van ingegoten spoor. In de op dit moment aanwezige constructie is te weinig ruimte om op een juiste manier een las inclusief voorboog aan te brengen. Vandaar dat de aanbeveling is om de constructie waar mogelijk aan te passen door de pockets te vergroten. De extra overspanning die daarbij ontstaat zal dan moeten worden opgevangen door een demonteerbare constructie op deze plaats te stellen.

Verder is het naast het verkrijgen van grotere pockets ook wenselijk om extra pockets in de constructie in te bouwen op plekken die vatbaar zijn voor schade. Het is raadzaam om spoorstaven op de brug niet langer

dan 50 meter onafgebroken te laten zonder de mogelijkheid om een reparatie uit te voeren. Hierdoor wordt de kans op een onverwachte noodreparatie die niet binnen een standaard buitendienststelling plaats kan vinden aanzienlijk verkleint.

10 Bibliografie

- [1] C. Esveld, „Collegedictaat Geometrisch en constructief ontwerp van wegen en spoorwegen Deel D. Constructief ontwerpen van spoorwegen,” TUDelft, Delft, September 2007.
- [2] E. Ludvigh, „Elastic behaviour of continuously embedded rail systems,” *Periodica polytechnica ser. Civ. Eng.*, p. Vol. 46, 2002.
- [3] RailPro, „www.voestalpine.com/railpro,” [Online].
- [4] Prorail, *Deel 2- Kadereisen voor metallurgische lassen in bovenbouwconstructies*, 2007.
- [5] C. E. Arjen Zoeteman, „Evaluating Track Structures: Life Cycle Cost Analysis as a Structured Approach”.
- [6] Edilon)(Sedra, „Rail replacement in Edilon)(Sedra ERS,” 2014.
- [7] Axion, [Online]. Available: <http://www.axionintl.com/products-composite-railroad-ties.html>.
- [8] C. Esveld, *Modern Railway Track*, Delft: MRT-Productions, 2001.
- [9] Edilon)(Sedra, „memo Rail Weldings in edilon)(sedra ERS,” 2014.
- [10] Edilon)(Sedra, „EDILON Corkelast® Embedded Rail System Information Sheet: Maintenance and Renewal,” 2007.
- [11] Edilon)(Sedra, „Orange Booklet: General installation instruction of edilon)(sedra ERS (Embedded Rail System),” Haarlem, 2014.
- [12] V. L. Markine, A. d. Man, S. Jovanovic en C. Esveld, „Optimum design of embedded rail structure for high-speed lines”.
- [13] P. Ryjáček, M. M. Howlader en M. Vokáč, „The Behaviour of the Embedded Rail in Interaction with Bridges,” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015.

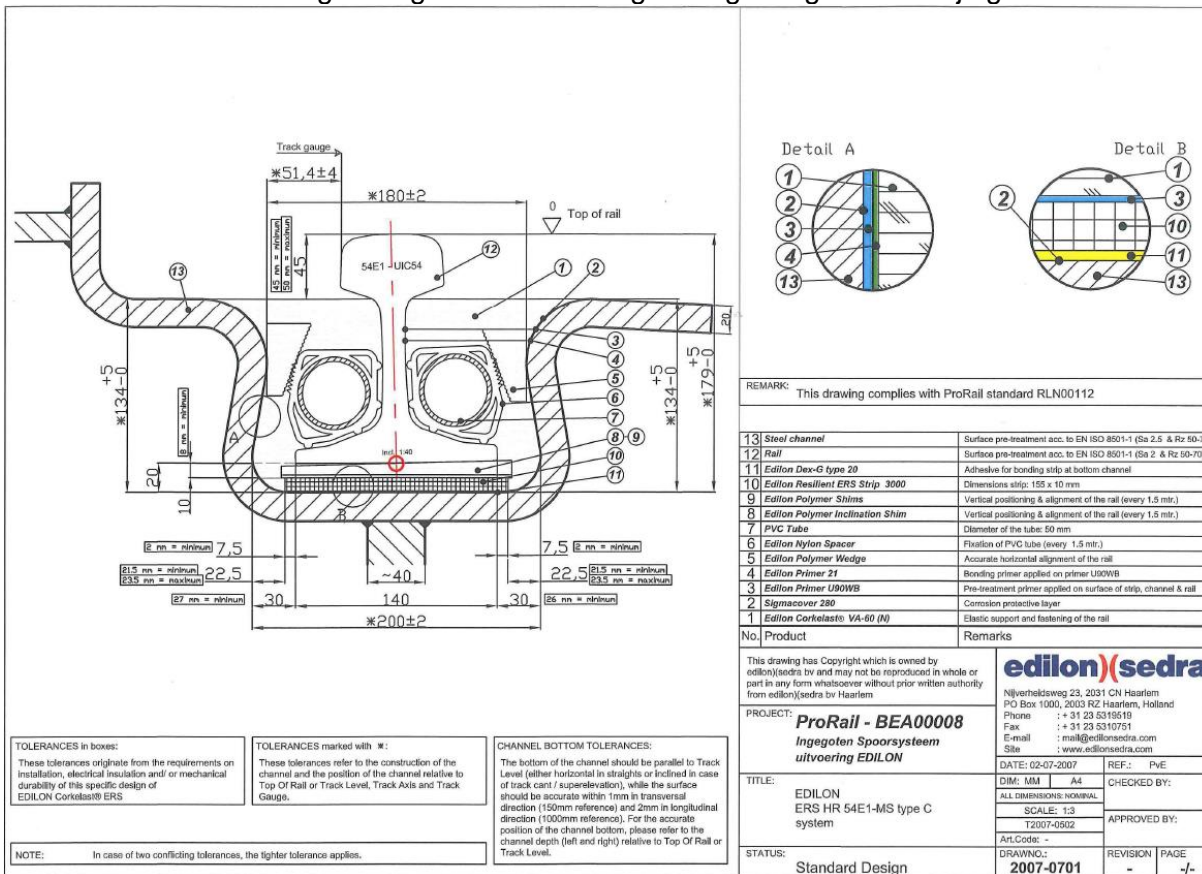
11 Bijlages

11.1 Bijlage Interview Edilon)(Sedra

Op 13 Mei 2016 heeft een informeel gesprek plaats gevonden met dr. Ir. Amy de Man. De heer de Man is Research & Development manager en System Development Manager bij Edilon)(Sedra. Edilon)(Sedra is wereldwijd marktleider bij de levering en ontwikkeling van ingegoten spoorstaaf systemen. Daarnaast heeft Edilon)(Sedra het ingegoten spoorstaaf systeem geleverd voor de aanleg van de bovenbouwconstructie op de Moerdijkspoorbrug.

In gesprek met de heer de Man en bij de rondleiding door de fabricage en testlaboratoria is het toegepaste systeem besproken en zijn de nieuwe technieken op het gebied van ingegoten spoorstaaf systemen gedemonstreerd. Hierbij zijn verschillende inzichten in de toegepaste technieken naar voren gekomen die kunnen worden gebruikt in het onderzoek naar een toepasbare alternatieve constructie voor het verbeteren van de reparatiewerkzaamheden aan ingegoten spoorconstructies.

Het toegepaste ingegoten spoorstelsel is gebaseerd op een spoorstaaf type 54E1-UIC54 die is geplaatst onder een helling van 1:40, zoals voorgeschreven in Prorail standard RLN00112. Het toegepaste systeem is het door Edilon)(Sedra ontwikkelde ERS HR54E1-MS type C. Het systeem staat hieronder weergegeven in onderstaande tekening. Een grotere afbeelding is toegevoegd aan in bijlage 13.5.

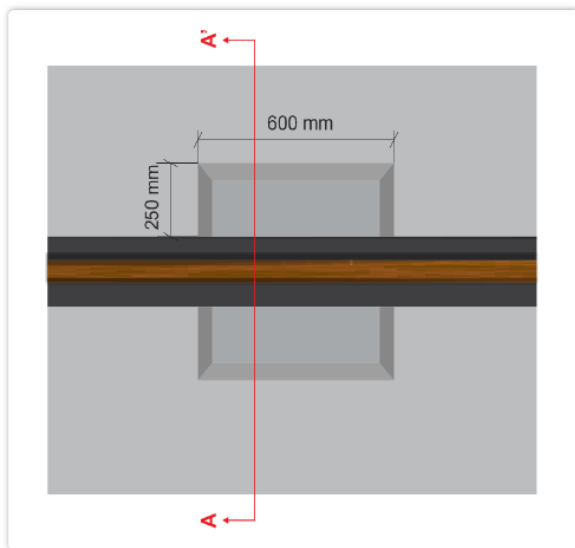


Figuur 33 Ingegoten spoorstaaf detailtekening

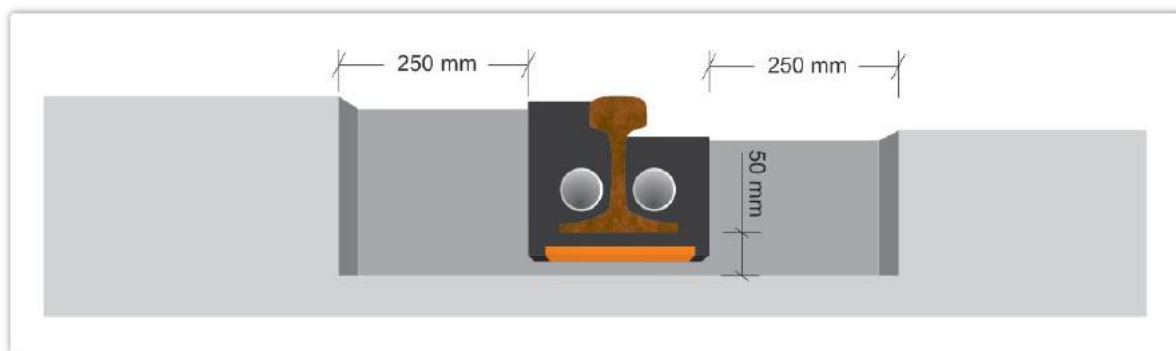
Iedere spoorconstructie bestaat uit een aaneenschakeling van delen ingegoten spoor, wissels, compensatieinrichtingen, lasverbindingen en pockets. Op de stalen bruggen zelf komen geen wissels voor, maar uiteraard wel de andere constructiedelen.

Pockets zijn speciaal gemaakt ruimtes voor het uitvoeren van reparaties, echter zijn niet alle pockets van eenzelfde formaat gemaakt. Er zijn minimale afmetingen van een pocket benodigd om voldoende constructieruimte te garanderen, hiervoor moet de pocket tenminste 600mm lang, 500mm breed en 50mm dieper dan de spoorstaaf ligt opgelegd. In stalen bruggen komen pockets vaak voor tussen verschillende brugdekken, aangezien hier geen goot is aangelegd om in te gieten. Echter zijn deze pockets vaak kleiner

dan wenselijk is voor het uitvoeren van reparaties. Op een stalen brug zoals de moerdijkbrug komen pocakets voor met een lengte van 300mm en zijn dus slechts half zo groot als benodigd. Deze afmetingen zijn onderzocht en voorgeschreven in de memo rail replacement [6]



Figuur 34 Pocket voor reparatie aan ingegoten spoor bovenaanzicht



Figuur 35 Pocket voor ingegoten spoor doorsnede A-A'

Zoals eerder vermeld worden regelmatig thermietlassen of bekistlassen toegepast in het spoor ter plaatse van een pocket. Dit gebeurt zowel na reparatie of spoorvervanging, maar ook bij het koppelen van spoorstaven worden deze met lassen op een pocket samengevoegd. Een lasverbinding is over het algemeen minder sterk dan een spoostaaf zelf en daardoor dient de vraag zich aan of deze zwakte significant is.

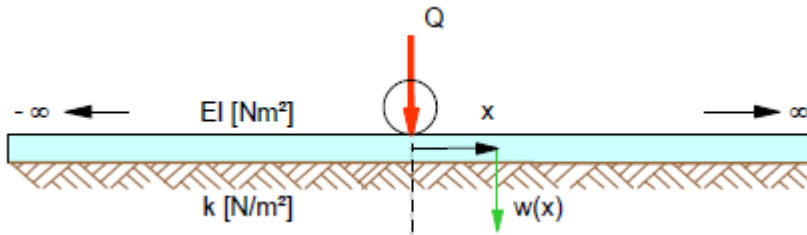
Twee extra onderzoeksvragen zijn daarom interresant voor het onderzoek.

- Wat zijn de constructieve eisen voor lasverbindingen in de geldende richtlijnen van ProRail? (Met name of een thermietlas significant zwakker is dan de spoostaaf?)
- Is een thermietlas in de praktijk net zo sterk als in de theorie wordt aangenomen?

Vanuit deze deelvragen kunnen we beantwoorden of de combinatie van een pocket met een lasverbinding voor dermate extra kwetsbaarheid zorgt. Mocht dit het geval zijn, dan kunnen we dit probleem proberen te voorkomen.

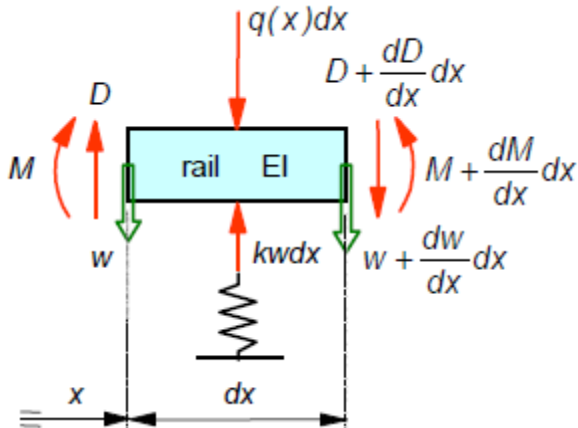
11.2 Bijlage voegloos spoor op continue elastische ondersteuning

Voor de krachtsverdeling op de normale ingegoten delen van het spoor kunnen we gebruik maken van de formules die worden beschreven in het Dictaat van Prof. Esveld [1] in Bijlage C voor voegloos spoor op continue elastische ondersteuning.



Figuur 36 Elastisch ondersteunde ligger

De doorbuiging van de spoorstaaf, geformuleerd met $w(x)$ kunnen we berekenen via de differentiaalvergelijking. Vervolgens kunnen we hieruit de momentverdeling in de spoorstaaf berekenen. Als we ook de momentverdeling in de niet elastisch ondersteunde spoorstaaf kunnen berekenen, dan wordt duidelijk hoeveel het verschil tussen beide gevallen is. Met dit verschil kunnen we beredeneren of dit significant leidt tot meer problemen op de niet ondersteunde delen.



Figuur 37 Spanningen op een spoorstaaf element

De evenwichtsvoorwaarden van een liggerelement zijn:

$$qdx + \frac{dD}{dx} dx = kwdx$$

$$Ddx = \frac{dM}{dx} dx$$

De constitutieve vergelijking voor de momentverdeling in de spoorstaaf luidt:

$$M = -EI \frac{d^2 w}{dx^2}$$

Deze vergelijkingen samen geven de differentiaalvergelijking:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw = q(x, t)$$

De uitwendige verdeelde belasting wordt buiten beschouwing gelaten aangezien deze minimaal is in vergelijking met de lokale aslast. Hierdoor volgt:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw = 0$$

Met de randvoorwaarden kan de doorbuiging van de spoorstaaf worden geformuleerd:

$$w(\infty) = 0; w'(0) = 0; w'''(0) = \frac{Q}{2EI}$$

$$w(x) = \frac{QL^3}{8EI} \eta(x) = \frac{Q}{2KL} \eta(x)$$

De vergelijking voor het buigend moment in de spoorstaaf kan dan worden opgesteld als:

$$M(x) = \frac{QL}{4} \mu(x)$$

Hierbij horen de volgende functies:

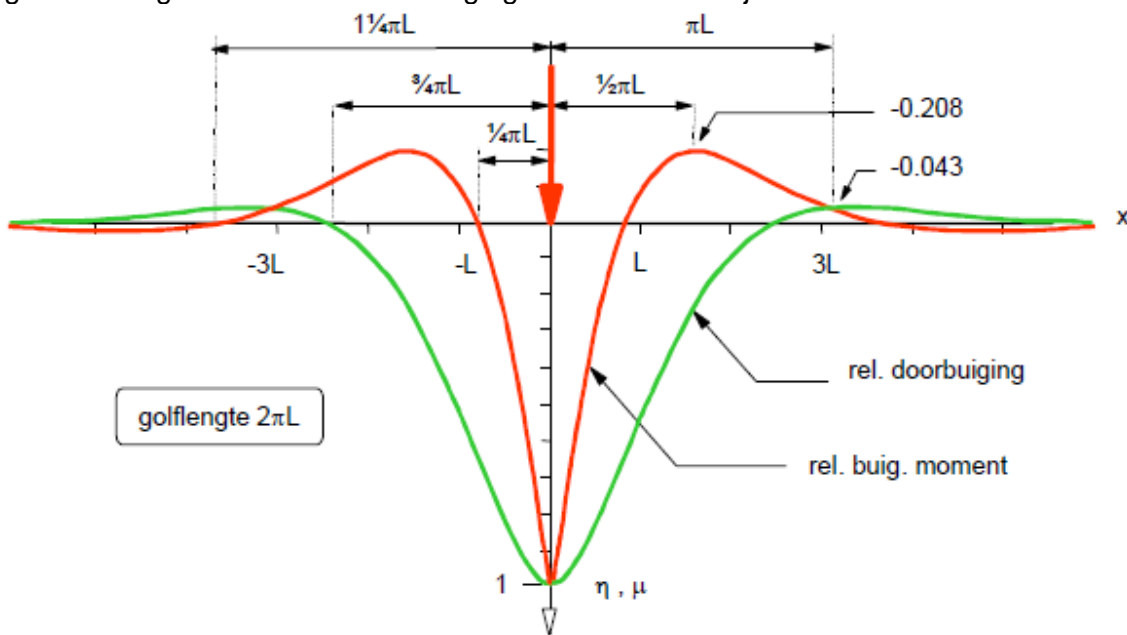
Karakteristieke lengte van het spoor $L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}}$

En de vormfuncties:

$$\eta(x) = e^{-\frac{x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right]$$

$$\mu(x) = e^{-x/L} \left[\cos \frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L} \right]$$

Dit geeft de volgende relatieve doorbuigings- en momentenlijn.



Figuur 38 Doorbuiging en momentsverdeling over spoorstaaf

ELASTIC BEHAVIOUR OF CONTINUOUSLY EMBEDDED RAIL SYSTEMS

Eszter LUDVIGH

Department of Highway and Railway Engineering
Budapest University of Technology and Economics
H-1521 Budapest, Hungary

Received: March 31, 2001

Abstract

Due to the rapid development of railway technologies new solutions spread widely. A fast development can be noticed in the field of fastening systems. This study expounds a new fastening type, the continuously embedded rail system. Its laboratory testing was carried out in the Railway Structural Laboratory of the Budapest University of Technology and Economics.

Keywords: permanent way, elastic fastening system.

1. Introduction

Probably one of the most spectacular developments that permanent ways went through since the beginning of the railways can be seen in the improvement of fastening systems. This development became more rapid in the last decades, especially in the last few years. It can be explained by the increasing demands of railway transport due to the competitive situation between transport means. The demands railways have to satisfy are the reduction of travel time, punctuality and comfort. These improvements are realised in practice by high-speed tracks and generally by continuously increasing speed. But these demands of railway traffic increase the severity of requirements a permanent way has to meet.

One of the most important aspects transportations are judged by is protection of the environment. Basically it can be stated that railway is an environment friendly means of transport. In spite of this fact the damaging influences that are mostly noise- and vibration nuisance have to be decreased. These considerations also justify the development of special solutions of permanent way elements.

The above detailed demands are especially valid in urban areas where the aesthetic appearance is very important, as well. An aesthetically built track that fits into the local conditions can even give a special face to a town.

All the requirements mentioned above revive the need of development of new fastening systems that basically differ from the traditional types.

2. Requirements of Fastening Systems

The most important function of fastening systems is to provide strong and flexible connection between rail and its supporting structure that can be sleeper or slab. In addition to this main function fastenings have to meet other requirements that are in some cases contradictory.

Functions that fastening systems have to fulfil:

A.) *Rail stability aspects*

- To have sufficient resistance against the vertical and lateral wheel-forces transferred by rail and thus provide gauge.
- To be able to accept the longitudinal loads and thus avoid rail creep and ensure the utilization of ballast resistance in case of continuously welded tracks.
- To allow sufficient frame rigidity by having large rotation resistance and thus avoid buckling of track.
- To behave elastically against the vertical and horizontal forces thus the damages caused by dynamic forces can be reduced.

B.) *Construction and maintenance aspects*

- To be suitable to be built in any section of the track – in straight and curved, on bridges and in tunnels, in open tracks, in station tracks and in turnouts.
- To ensure the electric isolation of rails.
- Its construction and maintenance to be simple, fast and mechanized. Individual parts of the fastening should be simply and fast replaceable, as well as the rails and sleepers.
- Not to cause too large wear, damage on the rail and the sleeper due to traffic.

C.) *Economical aspects:*

- To contain only few parts.
- Its price should correspond to its quality and lifespan.
- To need little maintenance.

Because of the newly appearing demands detailed in the introduction these requirements have to be completed. The new functions of fastening systems:

- To fasten the rail elastically in the horizontal plane, so not only vertically but laterally and longitudinally, as well. This elasticity could be designed in advance.
- To be able to use in slab tracks.
- To calm down the noise and vibration generated by the vehicle.
- With reduced need of maintenance its lifespan should increase.
- To be aesthetic.
- Plastic elements of the fastening should be recyclable.

3. Categorisation of Fastening Systems

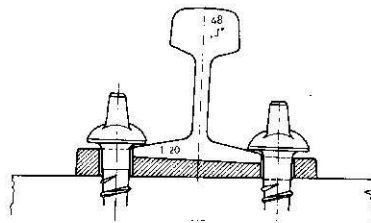
Fixing of the rail down to the supporting system can be basically solved with

- direct or
- indirect (separated)

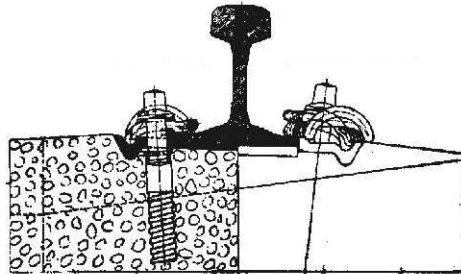
fastenings. Both types can be

- rigid or
- elastic,

depending on the elements used in the system. Direct fastenings can be seen in *Fig. 1*, while indirect fastenings in *Fig. 2*.



a) Direct, Rigid fastening with Coach Screw on Wooden sleeper

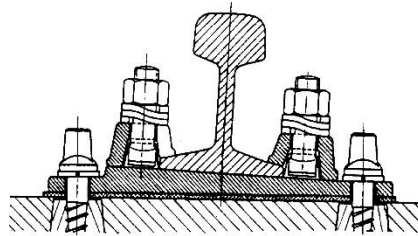


b) Flexible Fastening System, type w14 with Skl Clamp on Concrete sleeper

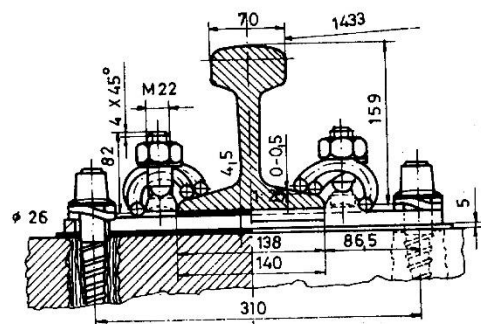
Fig. 1. Direct Fastenings

Due to new plastic industrial technologies a new fastening category was formed that can satisfy the increasing demands. These fastenings are the elastic embedded rail systems that can be categorized as follows:

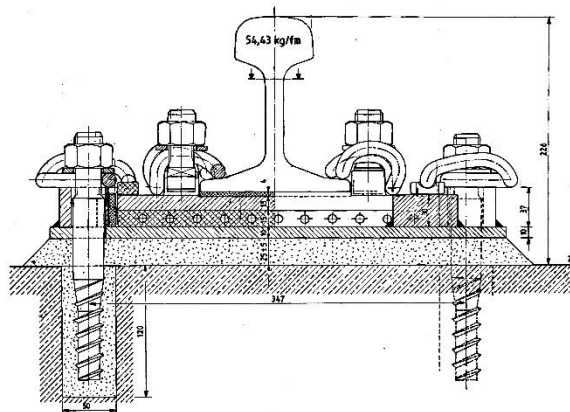
- A.) The rail is continuously embedded without using any clamping, anchoring element. The embedding can be created:
- by pouring in-situ,
 - by pre-fabricated rubber elements or
 - in manufacture by pre-coating.



a.) GEO Rigid Fastening System on Concrete Sleeper



b.) GEO Flexible System with Skl 3 Clamp on Concrete Sleeper



c.) Flexible Fastening System with Skl 12 and Skl ET Clamps on Concrete Slab

Fig. 2. Indirect Fastenings

- B.) The rail is discontinuously embedded without using any clamping, anchoring element.
- C.) The rail is fixed down traditionally with a flexible fastening system and the rail is embedded afterwards. The embedding can be executed:
- by pre-fabricated rubber or plastic elements or
 - by pouring in-situ.

4. Continuously Embedded Rail Systems, the Rail Poured Out In-Situ

4.1. Introduction of the Fastening System

The fixing of the rail in these systems basically differs from the traditional fastening systems, as steel anchoring elements are not used at all. In case of the continuously embedded rail systems the rail is laid in a longitudinal recess created in the base structure and poured out with elastic embedding material. This fastening system can be used only in ballastless tracks.

The general cross-sectional arrangement of the fastening system can be seen in *Fig. 3*. Its most important elements are:

1. longitudinal recess created in the base structure,
2. elastic embedding material,
3. elastic base strip,
4. space filling elements.

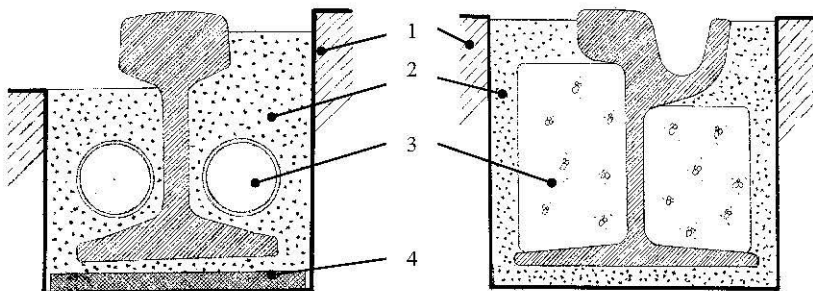


Fig. 3. Continuously Embedded Rail Systems

The material of the *recess* can be reinforced concrete or steel, depending on the track structure.

Fixing down of rail is realized by the contact of the *embedding material* with the rail and the recess surface. Widespread systems basically vary in the composition of this material, in most of the cases it is a two-component elastomer occasionally

with added cork. These self-spreading materials are usually adsorbing after 2 hours and obtain their total strength within 10–20 hours.

For obtaining greater vertical elasticity a rubber or cork *base strip* is placed under the rail.

For reducing the amount of the embedding material space filling elements are placed on both sides of the rail that can be PVC pipe or cement-based brick in the fish-plate pass.

4.2. Features of the Fastening System

The most important features of the system:

- The track becomes laterally elastic that ensures the permanence of the gauge.
- Good solution for slab tracks.
- Structural heights of tunnels and bridges can be reduced.
- Due to elastic bedding the radiated noise and vibration of track can be radically damped.
- Track maintenance need is low.
- Aesthetic appearance.

4.3. Mechanical Testing of Continuously Embedded Fastening Systems

4.3.1. Introduction of the Testing

Several types of similarly created continuously embedded rail systems were tested in the Railway Structural Laboratory of the Budapest University of Technology and Economics in the last years. As direct flexible fastenings were also tested during this period, it was possible to compare these.

The aim of the testing is to determine the behaviour of the system against vertical, horizontal lateral and longitudinal forces. For this reason the specimens were vertically and diagonally loaded with static load and the displacements were registered. Dynamic tests were also carried out in these directions in the 1 . . . 9 Hz frequency interval. Usually fatigue tests were also done with 3 . . . 5 millions of repetition number, thus the effect of repeated load on the structure could be analysed as well. Finally longitudinal displacement tests were carried out.

The specimens were usually 1 m long for comparability and because of the available amount of material and laboratory circumstances. Three different types of embedding material were used. The cross-sectional arrangements of the specimens were different in the rail (UIC 54, UIC 60, Ri52), in the space filling elements (PVC pipe or brick) and in the base strip. Specimens without base strip were also tested. The dimensions of the recess were also different basically depending on the rail type, but the thickness of the embedding material between the rail and recess surface was kept to be minimum 20 mm.

4.3.2. Vertical Bedding Coefficient

The vertical elasticity of the superstructure is very important to be able to stand the dynamic loads caused by the everyday traffic. The characteristics of this elasticity can be expressed by the bedding coefficient C [N/mm³] that describes the relationship between pressure p [N/mm²] acting on the bedding and deflection of the rail y [mm].

$$p = C \cdot y. \quad (1)$$

Empirical determination of the bedding coefficient can be executed by measuring the vertical deflection under the loaded area. Then C can be calculated by the following formula:

$$C = \frac{Z}{4sy} \sqrt[3]{\frac{Z}{EIy}}. \quad (2)$$

The symbols are:

Z – load [kN],

s – the width of support (rail flange) [mm],

E – elastic (Young) modulus of the rail [N/mm²],

I – inertial moment of the rail [mm⁴].

As the flexibility of the rail is considered in this method it can be used only in case of at least as long a specimen as the wavelength of the deflection A [mm]. The displacement wavelength can be calculated with the help of the theoretical calculation of the stresses in a longitudinally supported superstructure by Zimmermann:

$$A = 2 \cdot \frac{3}{4} \pi \cdot L = \frac{3}{2} \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{4E \cdot I}{C \cdot s}}. \quad (3)$$

In the above formula: L – length of rigidity [m].

The wavelength cannot be calculated without knowing the definite value of the bedding coefficient but with assuming an initial data, the minimal length of the specimen can be calculated. Assuming $C = 0.2$ N/mm³ that is less than expected $A = 4.35$ m. As there were only 1 m long specimens tested in our laboratory another method was needed for determining the bedding factor.

The other method of the empirical determination of the bedding coefficient after measuring y is using the

$$C = \frac{Z}{y \cdot s \cdot l} \quad (4)$$

formula, where l [m] is the length of the rail in the specimen.

This formula can be used correctly only in case of rigid deflection of the rail, in other words if the vertical displacement of the rail is the same in each cross-section of the specimen.

For examining the question if the results measured on a short specimen are correct, 12.5 m and 2.5 m specimens were tested in a foreign research laboratory. The bedding coefficient of the long specimen was calculated according to (2), while that of the short one according to (4) and the result was equal. It means that measuring on short specimen can provide correct result for the bedding coefficient.

As mentioned above, the condition of using formula (4) is the rigid deflection of the rail. For this reason the vertical displacements were always checked in three points, in the middle and the two ends of the specimens. Though the results were usually not the same in these points, the difference was negligibly small.

The final results of the measurements on different types of continuously embedded rail systems loaded with static force resulted $C = 0.22 \dots 0.48 \text{ N/mm}^3$. The tests proved that the value depends basically on the properties of the embedding material and the existence of the base strip. According to the result it can be stated that structures the bedding coefficient of which is near the lower value are better from the point of view of track elasticity. It is especially important in case of transition zones where ballasted and slab tracks are meeting and the elasticity changes suddenly, as the bedding coefficient of ballasted tracks is only about $C = 0.1 \dots 0.15 \text{ N/mm}^3$.

The values of the coefficient determined from dynamic tests were in each case higher than the above, $C = 0.26 \dots 1.20 \text{ N/mm}^3$. According to the results it can be established that the value of the dynamic bedding coefficient of more rigid systems (C is high) grows much more than those of more elastic ones.

Similar measurements repeated after the fatigue test proved that the value of the coefficient grows by approximately 10–30%.

4.3.3. Lateral Elasticity

One of the most important roles of fastenings is to avoid the overturning and the lateral sliding of rail or to keep these movements in low limits and thus ensure constant gauge for a long time. In case of traditional fastenings it is ensured by heavily tensioned clamping elements that hold down the rail.

In case of continuous embedding the lateral displacement of the rail depends on the elasticity of the embedding material. There is no unique solution for calculating a lateral bedding coefficient as the thickness of the materials is inconstant within a cross-section and the overturning of the rail causes unknown reaction forces. For this reason the aim of the testing was to measure the lateral displacements.

Beside recording the lateral displacements due to different static and dynamic loads, they were also continuously recorded during the fatigue test. The most important practical result of the fatigue test is the change of the lateral displacement during the repeated load. It helps predict the lifespan of the track gauge. The lateral displacements of continuously embedded systems can be seen in *Fig. 4* in comparison with direct and indirect traditional fastening systems, as function of repetition number.

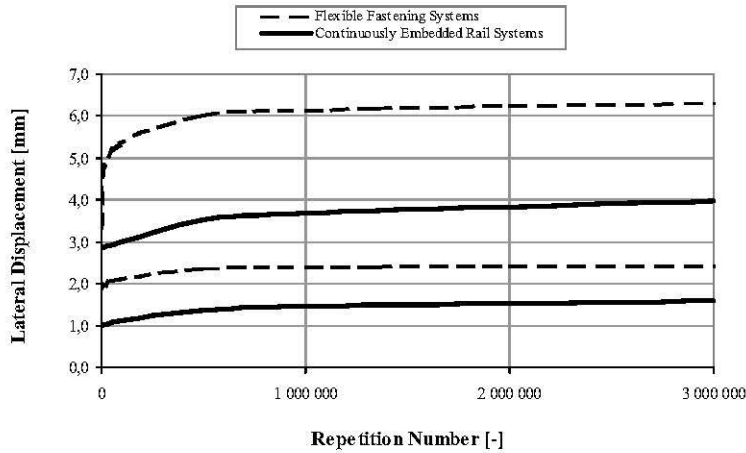


Fig. 4. Lateral Displacement of Rail During Fatigue Test in Case of Different Flexible Fastening Types and Embedded Rail Systems

The solid curves in the diagram present the extreme behaviour of continuously embedded systems, while the dashed lines show the traditional flexible fastenings that were tested in our laboratory.

The bottom dashed line was measured on direct, flexible fastening (type Fig. 1b) while the upper dashed line on indirect, separated flexible type (see Fig. 2c). The fatigue tests were always performed on a single pair of fastenings according to scissor scheme, never on longer track field.

The thick boundary curves were chosen as the minimum and the maximum values measured on different embedded fastening systems and converted to 0.6 m long specimen. According to the results it can be stated that the lateral displacement of the structure depends first of all on the elasticity of the bedding material. In case of specimens with brick space filling the displacements were always less than those with PVC pipe which can be explained by the smaller amount of material beside the rail.

As the curves represent the displacements of 0.6 m long structures for the same test loads they can be compared with each other. But here it must be remarked that the real displacement in the track will be less because of the load distribution effect of the adjacent fastenings or the continuous embedding.

The comparison of the values generally proves that continuously embedded fastening systems suffer less lateral displacement as an effect of repeated load than flexible spring fastenings. It is also an experimental observation that these materials have delayed elasticity, which means that after load removal the residual deformation was always less than 1.5 mm.

4.3.4. Longitudinal Bedding Factor

An important part of the laboratory testing is to measure the resistance of the structure against longitudinal (dilatation) forces. This can be carried out by longitudinal displacement test.

Completing these tests it can be established that the bedding material behaves like a spring. It means that tensile force is generated in the material during the dilatation movement that is proportional to the displacement. The elasticity that represents the longitudinal behaviour of this system can be expressed by the spring constant d_l [N/mm]:

$$d_l = \frac{F}{\Delta l}. \quad (5)$$

In the above formula

F – longitudinal force [kN],
 Δl – displacement [mm].

As the value of d_l depends on the length l [m] of the test specimen it is more practical to calculate with its specific value. This specific value is the longitudinal bedding factor

ρ [kN/mm/m] that can be calculated as:

$$\rho = F/\Delta l/l = \frac{d_l}{l}. \quad (6)$$

This expresses the force that results 1 mm longitudinal displacement on a 1 m long specimen.

Completing the tests and calculating ρ the results are between 11.9... 44.4 [kN/mm/m]. The force-displacement diagrams belonging to these extreme values with solid lines can be seen in *Fig. 5* converted to 0.6 m length. This figure also contains the behaviour of a traditional, good quality flexible fastening against longitudinal forces illustrated by the dashed line.

It must be remarked that the goodness of a system cannot be seen directly from the value of ρ or the slope of the curve, but it has to be proved by theoretical calculation that was worked out in the Railway Engineering Department many years ago. This calculation determines the minimum value of the elastic rail end movement the system should have due to the real dilatation forces.

According to the formerly mentioned results generally it can be stated that those systems are better which have smaller slope in the force-displacement curve, in other words which have greater displacement for the same force.

It was also proved that systems with PVC pipe space filling have small value of longitudinal bedding factor, as the contact area of the bedding material and the rail is much bigger than in case of bricks. It is also proved that systems in which the bedding material is more elastic can suffer bigger longitudinal movement without destruction and its residual deformation will also be smaller.

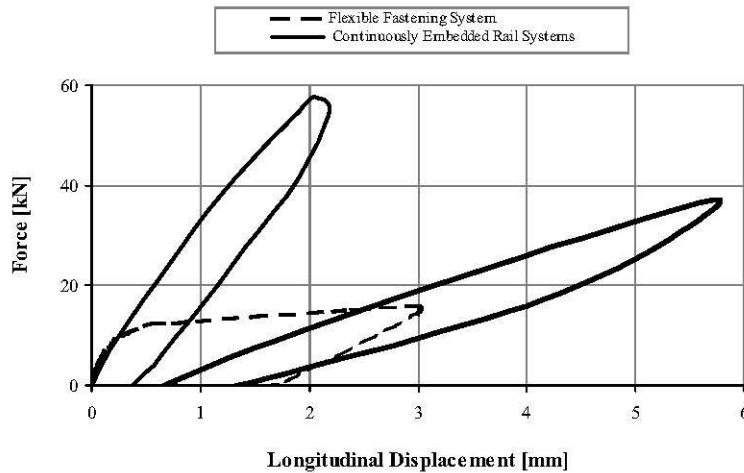


Fig. 5. Longitudinal Displacement of Rail in Case of Different Embedded Rail Systems and a Flexible Fastening Type

It can also be stated that continuously bedded rail systems can bear much more longitudinal force without destruction and have smaller residual deformation than the traditional, flexible fastenings.

5. Summary

The steadily growing demands of transport clearly show the way of the improvement that railway track structures have to move forward. These demands urge the technological companies to develop new methods, like the continuously embedded rail systems as fastening types that are already world-wide known and used.

A newly developed fastening system not only must have new properties like damping of noise and vibration but must perform at least as well as an existing system does. In this case the laboratory test carried out in the Railway Structural Laboratory of Budapest University of Technology and Economics proved that the continuously embedded rail systems not only have several new advantages but can bear the traffic loads better and for longer than formerly used types.

References

- [1] VÁSÁRHELYI, B., *Railway Track Superstructure*, Közlekedési Kiadó, 1953.
- [2] NEMESDY, E., *Railway Track Superstructure*, Tankönyvkiadó, 1966.
- [3] MEGYERI, J., *Railway Engineering*, Műegyetemi Kiadó, 1997.

- [4] HORVÁTH, A., *Arrangement and Design of Rail Fastening Systems*, Műszaki Könyvkiadó, 1984.
- [5] SZAMOS, A., *Materials and Structures of Railway Track Superstructure*, KÖZDOK, 1991.
- [6] ESVELD, C., *Modern Railway Track*, MRT Production, West-Germany, 1989.
- [7] HORÁTH, F. (ed.), *Construction and Maintenance of Railway Track I–II*, MÁV Vezérigazgatóság, 1999.
- [8] KORMOS, GY., Longitudinal Behaviour of Rail Embedded in Elastic Material, *Közlekedéstudományi Szemle*, 2001, (under publication).
- [9] KAZINCZY, L. – KORMOS, GY. – LUDVIGH, E., Study about the Adaptation of Edilon Fastening System on the Bridges of the Newly Designed Railway Line between Zalaötvö-Bajánsenye, 1999.
- [10] *Theoretical and Laboratory Examination for the Certificate of Competency of the Edilon Rail Fastening System*, – Final Report, TUB, Department of Railway Engineering, 1996.
- [11] *Approval Test about the Possible Adaptation of Edilon Rail Fastening System in 160 km/h Speed Tracks*, TUB, Department of Railway Engineering, 1999.
- [12] *Approval Test about the ORTEC Powerflex Embedded Rail Fastening System with Rail-type Ri52*, BUTE, Department of Highway and Railway Engineering, 2001.
- [13] *Approval Test about the ORTEC Powerflex Embedded Rail Fastening System with Rail-type UIC54*, BUTE, Department of Highway and Railway Engineering, 2001.
- [14] *Research Study about the Approval Tests of Rail Fastening System W14 of Vossloh Rail Systems Ltd.*, BUTE, Department of Highway and Railway Engineering, 1999.
- [15] *Research Study of the Approval Tests about the Modernisation of Rail Fastening System of the Northern-Southern Budapest Underground Line Recommended by Vossloh Rail Systems Ltd.*, BUTE, Department of Highway and Railway Engineering, 2000.

Evaluating Track Structures: Life Cycle Cost Analysis as a Structured Approach

*Arjen ZOETEMAN¹, Coenraad ESVELD²
Delft University of Technology

Department of Transport and Logistics' Organisation
Faculty of Technology, Policy and Management
Jaffalaan 5, PO Box 5015, 2600 GA Delft
Tel: +31-15-278-1135
Fax: +31-15-278-3429
E-mail: a.zoeteman@sepa.tudelft.nl

Summary

In many countries restructuring of railways and increasing efficiency requirements cause a changing environment for infrastructure management. Responsibilities for parts of the railway system are often handed over to different actors. In order to guarantee optimal long-term results for the railway system the effects of decisions should be systematically evaluated. Life cycle cost analysis (LCCA) can provide a framework for this evaluation.

At TU Delft two LCCAs were performed in recent projects on the comparison of different track structures. The first LCCA was part of a research study for the Madrid Regional Government (*Comunidad de Madrid*). The Comunidad de Madrid is responsible for a large extension programme of the Madrid Metro network. Several track structures were evaluated on their expected life cycle costs in co-operation with the Comunidad de Madrid and Madrid Metro. A block system track proved to be the best choice considering the life cycle costs. The LCCA provided also insight into the decisive factors determining this outcome.

Another LCCA was set up in co-operation with Strukton Railinfra, the largest Dutch railway contractor. During the last few years much technical research has been conducted in the Netherlands on the embedded rail structure (ERS). Innovations in the production process, e.g. using paver-technology, and laboratory experiments caused renewed interest in this track structure. Strukton Railinfra needed more insight into the financial feasibility of the structure; ERS is only an attractive option for (new) railway lines if it performs well in financial terms: extra investment must pay out. A decision-support tool was developed to combine technical thresholds estimated by experts and financial data. For the comparison of ERS and ballasted track the data related to a 3-km test track, constructed for Netherlands Railways, was used. ERS proved to result in a 20% life cycle cost decrease according to the agreed estimates of different experts. This result has been a reason to continue the research on ERS. More insight into some risk factors needs to be gained, but there is likely a market for ERS.

The LCCAs proved to be a good vehicle for communication between the experts involved and showed the most important aspects for data collection. Especially for evaluation of new technologies life cycle cost analysis can provide a framework to obtain a systematic approach being accepted by the actors involved. In a situation where infrastructure management has become a function performed by a separate entity that has to cope with increasing performance requirements, LCCA can serve as a tool to make decisions more systematically.

¹ PhD candidate Life Cycle Management at the Faculty of Technology, Policy and Management

² Professor of Railway Engineering at the Faculty of Civil Engineering and Geosciences

Key words

Track structures, life cycle cost, infrastructure management, maintenance, innovation

1. Introduction

Policy makers increasingly consider railways to be an important part of the overall transportation system. In the European Union this change is illustrated well by the official EU transportation policy: railways are considered promising as an alternative for congested, polluting road traffic. However, in order to realise that objective, the performance has to be improved on aspects such as availability, reliability, cost-effectiveness, safety and comfort. In many countries, such as the Netherlands, policy makers have chosen to separate the railway operations from the infrastructure management. This 'vertical separation' should facilitate competition in the rail transport market and should distinguish responsibilities more clearly [EU 1991; Vincent et al 1996].

In the Netherlands the Dutch government has established three so-called task organisations: an infrastructure manager (*NS Railinfra-beheer*), a capacity manager (*Railned*), and an organisation for traffic control (*NS Verkeersleiding*). The outplacement of these organisations out of the organisation of Netherlands Railways (NS) is scheduled for the year 2000. For the management of the High Speed Line South, which is to be taken into service in 2005, yet another arrangement has been made: a private sector based Infrastructure Provider (IP) will be selected to construct and manage the railway system for a period of 25 years. The IP will receive a quarterly fee for the realised system availability – a penalty system will be applied for availability performance [HSL South ITC 1999].

The environment created by changing railway policy has an impact on the actual position of infrastructure management. The infrastructure manager, responsible for design, construction, maintenance, renewal and upgrading of the infrastructure, has a clearly defined role and is confronted by increasing performance requirements of the other 'actors'. Budgets are reduced, as availability has to be increased without endangering the traffic safety. A systematic approach is needed for communication with the capacity manager and central government and for guaranteeing defined levels of performance. This approach is lacking in an organisation where maintenance and renewal has long been planned and executed according to personal experience and skills (not to say that this is automatically a faulty way of working) [Swier 1997].

In order to establish a continuously high performance level of the infrastructure it is important to systematically consider the long-term effects of decisions: for instance, expected costs for different levels of performance (availability, etc.) must be made explicit for making agreements with the central government. This causes maintenance to become an important factor for considering investment, maintenance and renewal cost balanced...

In this paper *life cycle cost analysis* is put forward as a framework on which decision making should be based in order to realise the above-mentioned (paragraph 2). Life cycle cost analysis (LCCA) is a technique to systematically identify and value life cycle costs (LCC). The life cycle costs are made up by costs of construction, maintenance, renewal (*cost of ownership*) and costs related to track availability and reliability (*cost of operation*). Also cost effects on other assets, e.g. substructure, noise protection measures and tunnel diameter should be considered. Although expectations on maintenance are often hard to make due to uncertainty, especially for new technologies, there are several ways to deal with this uncertainty in the analysis.

As a way to illustrate the use of LCCA two cases are presented, both related to the choice of a track structure. The choice for a track structure is a very important one in the design process, since a change of track structure is hardly possible during the service period of a railway line. It is an important factor in infrastructure costs and availability. The first LCCA was performed for evaluating track structures for use in the Madrid Metro extension programme (paragraph 3). In the second case the financial feasibility of the Embedded Rail Structure, developed by NS, was investigated being compared with standard ballasted track (paragraph 4). Conclusions are drafted in paragraph 5.

2. Life cycle economic analysis for rail infrastructure

Rail infrastructure, like other production goods, requires huge investments (fixed costs) and the components have rather long life spans. Flexibility in changing the system after train services have started is limited and for this reason the 'running costs' of a system design should be considered early: modifications in the design are relatively easy and inexpensive. Incorporating the running costs in decision-making processes has been the objective of life cycle costing [Flanagan et al 1989].

A life cycle cost (and benefit) analysis is a first step in the process of identifying, evaluating and managing life cycle costs. In a regular LCCA study a time horizon is set together with the decision maker; for instance for the HSL South project, potential contractors are interested in a period of 35 years: 5 years of construction, 25 years of maintenance, and a usability guarantee of 5 years. The costs to be investigated are selected according to a cost-breakdown structure (CBS). To use the HSL South again as an example: the penalty regime for a low availability (due to speed restrictions and malfunctioning) requires for the contractors the inclusion of availability performance for comparing track structures. After this has been set, the availability of data must be considered. In many cases data has to be gathered from different actors for a successful analysis e.g. from the construction department, the maintenance department, technology suppliers and the capacity manager (prognosis on traffic growth and tonnage development). This is one of the reasons for the importance of a feasible data collection plan i.e. selecting decisive factors for the life cycle costs and experts to consult, because new technology 'expert opinions' and field or laboratory tests are the only way to estimate the quality decline. The (computer-based) calculation model largely depends on the data available. The consequential uncertainty can be compensated to some degree by performing sensitivity analysis: tonnage growth and thresholds can be varied in order to study whether this influences the choice and to identify important cost factors. This can be input for a more extensive risk analysis.

The time value of money is in LCCAs an important parameter. Future costs caused by maintenance are valued at a lower rate than current costs: a discounting process makes the cash flow, occurring in different years, comparable with the construction costs (present value). The construction costs have to be financed longer (there is no revenue during construction) and are more important to the decision maker.

3. CASE 1: Decision-support for track structure selection for the Madrid Metro

Since 1994 an extension of the Madrid Metro network is being realised: 35 kilometres of double track (in tunnel) are constructed. In 1998 both at the responsible Regional Government (*Comunidad de Madrid*) and at the Metro Company (*Metro de Madrid*) questions arose on the track structure to be used. Ballasted and block system track have both a long history in Madrid. Block systems, such as Stedef and Edilon systems³, have been in use since the 1970s. For the new extensions the Edilon system was considered (figure 1).

Advantages of the Edilon system are the fixation of track geometry, the absence of components that require a lot of maintenance e.g. ballast, and the controlled elastic support and quality of the blocks [Esveld et al 1998]. Another advantage is that the blocks can easily be transported and replaced manually (in opposite to sleepers). However, requirements on the construction process are high: the quality of the corkelast compound and concrete blocks must be guaranteed and the fixation of the rail must be done accurately. Investment in the Edilon system is less than 15% more; the blocks are produced near Madrid and the production is relatively inexpensive.

³ The Edilon system is constructed top-down: first the rails and the blocks are positioned and then the blocks are cast in concrete. A Corkelast compound, mixture of cork and polyurethane, is used to provide a controlled amount of elasticity. In Madrid prefab Corkelast is used in the blocks.



Figure 1 Block track in construction and in use (*Metro de Madrid*)

The approach to include maintenance needed much attention. Madrid Metro could not supply regular replacement/renewal thresholds; repair and small-scale replacement at night-time are common practice. The maintenance organisation proved to be rather labour-intensive. This largely determined the model design: data was available from the Annual Reports of the Maintenance Department over the last couple of years. A financial model, which used average (mostly annual) quantities of repair and replacement, productivity figures, labour and material costs, was developed [Zoeteman 1998a]. Although these reports were rather detailed, not all factors influencing maintenance, such as design standards and components used (e.g. fasteners), could be distinguished. More troublesome was the fact that the replacement of blocks was not assigned to the different block systems. For this reason upper estimates were made for the replacement of Edilon blocks together with the maintenance staff. For a selected new line expected maintenance was estimated with the help of maintenance staff. The expected total present values of the block system and the ballasted track were calculated over 50 years with a discount factor of 5%. The expected effect of using the Edilon block system was *at least* a reduction of 10% of the LCC (excluding inflation) in all the investigated scenarios; the sensitivity analysis was needed due to the uncertainty in the data.

It was clear that the collection of reliable maintenance data caused problems, e.g. the use of average figures: the importance of systematic data storage is needed to improve the value of LCCA. However, since the analysis was done in close co-operation with the Comunidad and the Metro Company, the results were satisfying for the Comunidad and the study confirmed that a choice for block track was the best, as far as could be anticipated. A lot of investment in Madrid was also used for realising a straight tunnel floor by pouring in concrete: a possible integration of the track structure with the substructure could result in more savings.

An important finding is that the choice for the track structure strongly depends on the local situation, e.g. labour costs and construction costs. Furthermore, the conditions during construction and the quality of the subgrade (tunnel floor) are important parameters.

4. CASE 2: Life cycle cost assessment of the Embedded Rail Structure

In the Netherlands renewed interest has arisen on the Embedded Rail Structure (ERS), a track structure that was developed in the 1970s. In the 1970s a short test track was made using prefab slabs and it was in the 1980s that the structure was introduced in level crossings for heavy road traffic. A new, 'industrial' production method, using a paver has become sufficiently reliable and accurate (see figure 2). In the ERS also a corkelast or likewise compound is used for attaching the rail to the concrete supporting bed; the main advantage of ERS is providing continuous support in contrast to discrete systems, such as Rheda and Shinkansen slab track (figure 2).

A better rail fatigue performance is expected based on laboratory tests and dynamic behaviour calculation models leading to an increased life span⁴. Moreover, the structure has the lowest height and weight, safety is considered less endangered by the occurrence of rail defects (due to the support provided to the rail) and noise can be reduced due to the elastic support. Possible risks of using ERS include settlements in the subgrade and faults in the construction process and material requiring corrections. Other research issues include the production circumstances, e.g. temperature range, the installation of trackside equipment, e.g. cables, and the maintainability (replacement rate of rails). Replacement of rails is well feasible, but takes more time. This can be a problem for the track availability on lines with high traffic intensities.



Figure 2 Construction of Embedded Rail with paver
(Test track near Best, the Netherlands; source: Strukton Railinfra)

Although ERS is, for high-speed services, a non-proven technology, the great impetus about ERS research also reached Strukton Railinfra, the largest railway contractor in the Netherlands. Strukton needed more insight into the possible financial feasibility. ERS is rather expensive compared to ballasted track, although there are still optimisation possibilities [Esveld 1999]. The construction price is comparable to prices that are mentioned for Rheda track (900 to 1000 Euro). Although this price needs to drop further for large-scale application, an LCCA was performed at Strukton Railinfra in order to investigate whether the extra investment pays out already.

In order to investigate the life cycle costs for this new track structure, a prototype decision-support system was to be developed based on the concept of combining expected thresholds and cost data. The railway track was divided in a number of 'building blocks' such as rails, sleepers, ballast bed, etc. For every building block the most important indicators were selected for determining the quality and maintenance of the building block, e.g. rails *standard deviation of top / track tamping* and rail wear or *cumulative tonnage / rail replacement*. As load is one of the most determining factors for maintenance and renewal, quality decline is mostly dependent on cumulative tonnage and harmonisation policy (figures 3 and 4). Important cost data to be collected are the discount rate to be applied, unit costs of maintenance and renewal (day/night/weekend), length of maintenance slots, average distribution of maintenance work over days, nights and weekends, and productivity rates (hours/km).

⁴ With UIC60 at least 1100 to 1300 million tons is expected (for the HSL South). Estimate used by Strukton Railinfra.

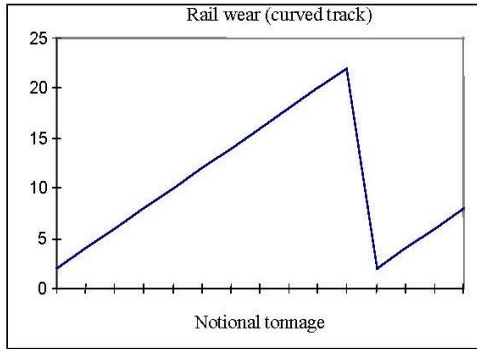


Figure 3 Example change in quality (rail wear)

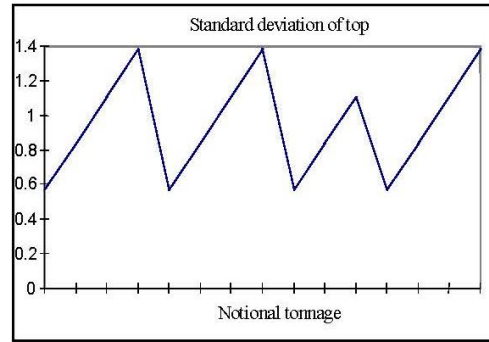


Figure 4 Example change in quality (standard deviation of rail top level), with interaction

The distribution over days, nights and weekends and the common length of a maintenance slot are both important for unit costs, productivity (starting-up and finishing result in fixed time required) and traffic disruption. A final feature of the prototype was to use thresholds depending on tonnage and to use a 'timetable' as input. Calculation of a notional tonnage, variable over the years, makes it possible to investigate the effects of different use/load scenarios: *what is the effect on costs, if different traffic intensities occur.* For a fair comparison also insight into the costs of traffic disruption are required; this proved, however, not to be feasible, since detailed traffic data were lacking and project time was short (figure 5).

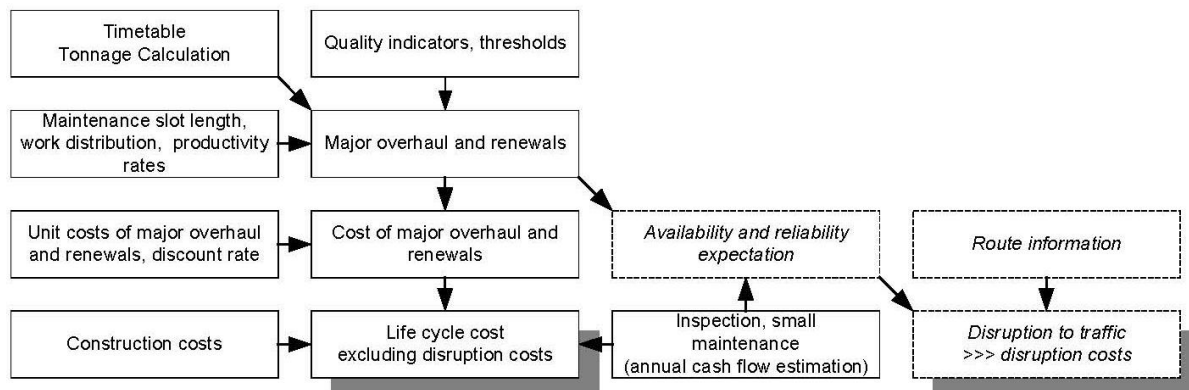


Figure 5 Concept of the Life Cycle Cost Model

The choice has been made to concentrate on the railway track works *only*, although ground works for preparation of the track laying also differ for ERS and ballasted track. The effects of necessary *preparatory work* differ for different subgrades. Although construction costs of the railway track were about 40% higher than ballasted track, the total discounted life cycle costs were calculated to be 20% less than those of the ballasted track used in the Netherlands, which are about 2300 guilders per metre (figure 6). A rail renewal was not needed in the period considered and this means that only some annual maintenance is foreseen. Costs of inspection and

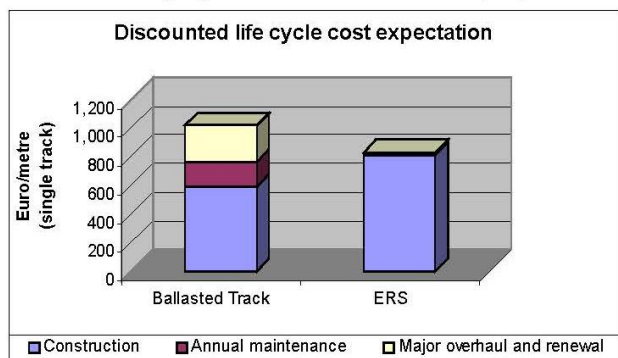


Figure 6 Outcomes for a representative NS situation (present values)

rail grinding were not included in the comparison [Zoeteman 1998b].

The findings for ERS were promising, not only considering the ownership costs but also the expected reduction of traffic disruption due to the low maintenance demand. The study at Strukton Railinfra is continued in relation to the High Speed Line South tender. A more extensive risk assessment is currently being performed in order to get an overall picture of the applicability of ERS. These risks can be expressed as annual costs or specific risks during the life span. A different LCC study for high-speed track assessment confirmed the results so far [Esveld 1999].

Especially the ability of the LCC model to vary factors such as unit costs, productivity, tonnage and thresholds in order to identify the likely changes in outcomes is important for decision making under uncertainty. Sensitivity of outcomes and cost margins available for risk management can thus be found.

5. Conclusions

The choice of a track structure depends on many factors influencing the life cycle cost, such as labour costs, subgrade, maintenance slots regime, traffic intensities and characteristics, maintenance concepts (e.g. balancing maintenance and renewal) and risks. For instance the specifics of high-speed operations will have an impact on the choice. Also the implementation of a new work safety policy in the Netherlands, requiring all maintenance to be performed in out-of-service periods, has a huge impact.

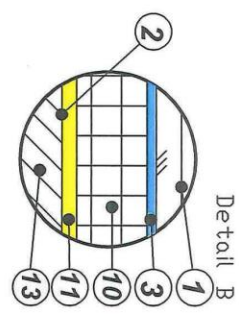
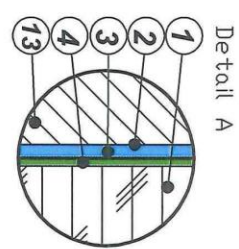
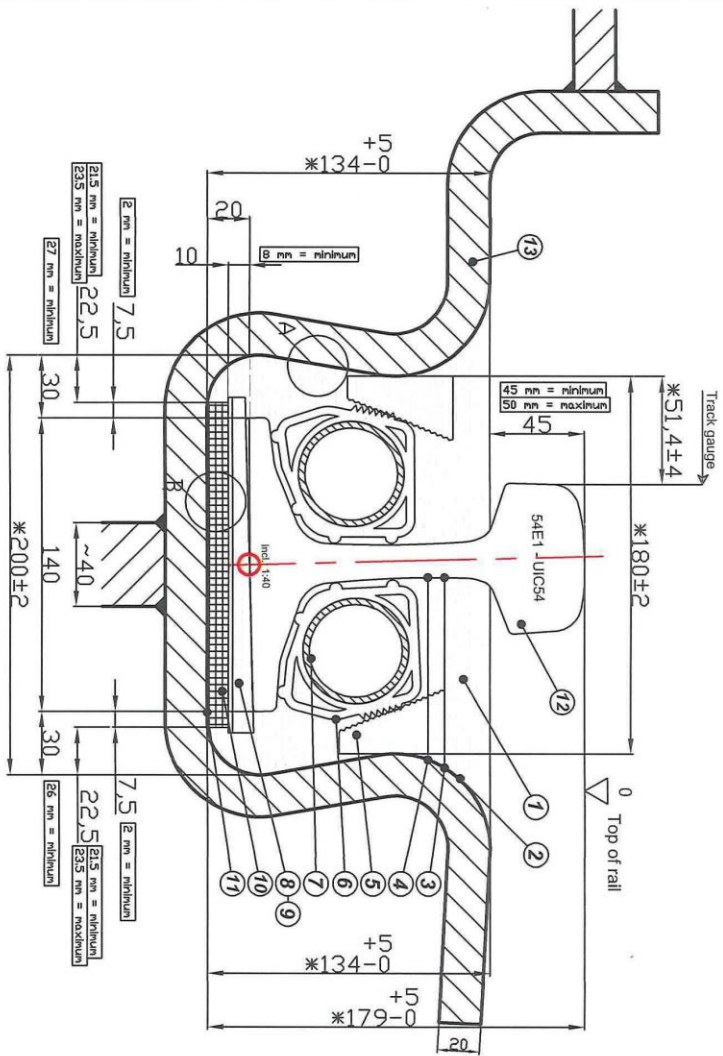
An LCCA can be a way of supporting the decision making in a structured way, considering the above-mentioned factors. For the ongoing discussion on ballasted and slab track life cycle cost analysis could be a means to systematically consider the pros and cons of the track structures involved. Developing a (shared) Life Cycle Cost model for assessing the track structures considering the specifics of a situation is a way to structure the discussion amongst experts e.g. identifying the decisive cost factors and deducting issues for further research. In other words, it can serve as a vehicle for discussions on so-called 'unproven technology', in which 'maintenance' and 'maintainability', given specified safety levels, are often mentioned as key factors.

Systematic decision making is more and more a necessity to guarantee the long-term performance of the track, and the rail infrastructure in general, in a situation where the infrastructure manager has to cope with increasing demands from different actors. Life cycle cost analysis can be an important contribution to this aim.

BIBLIOGRAPHY

- Advisory Group to the European Commissioner for Transport (D. Vincent et al.), *The future of rail transport in Europe*, Brussels, 1996 (see also European Union (EU), Directive 91/440)
- Esveld, *Slab track: a competitive solution*, in: Rail International/Schienen der Welt, June 1999
- Esveld, C., D.J. Vermeij, J.W. Diels, A.D. van der Vlugt, A. Zoeteman, P.N. Scheepmaker and A.P. de Man, *Metro de Madrid Project: Executive summary*, TU Delft, 1998
- Flanagan, R., G. Norman, J. Meadows and G. Robinson, *Life cycle costing*, Oxford, 1989
- High Speed Line South Project organisation, *Invitation to Consult, tender documents*, Utrecht, 1999
- Swier, J., *Output-procescontracten: sturen op output en afstand van onderhoud en storingsherstel*, NS Railinfra, Utrecht, 1998 (in Dutch)
- Zoeteman, A., *Application of life cycle management to the management of rail infrastructure: a financial comparison of alternative track structures*, TU Delft, 1998a (in Dutch)
- Zoeteman, A., *Onderzoek naar total life cycle costs bij de Nederlandse Spoorwegen: de eerste resultaten van toepassing van LCCP98 op ballastspoor en de embedded rail constructie*, Strukton Railinfra, Maarssen, 1998b (in Dutch)

11.5 Bijlage Constructiekening ingegoten spoor



REMARK: This drawing complies with ProRail standard RLN001122

13	Steel Channel	Surface pre-treatment acc. to EN ISO 8501-1 (Sa 2.5 & Rz 50-70)
12	Rail	Surface pre-treatment acc. to EN ISO 8501-1 (Sa 2 & Rz 50-70)
11	Edilon Dex-G type 20	Adhesive for bonding strip at bottom channel
10	Edilon Resilient ERS Strip 3000	Dimensions strip: 155 x 10 mm
9	Edilon Polymer Shims	Vertical positioning & alignment of the rail (every 1.5 mtr.)
8	Edilon Polymer Inclination Shim	Vertical positioning & alignment of the rail (every 1.5 mtr.)
7	PVC Tube	Diameter of the tube: 50 mm
6	Edilon Nylon Spacer	Fixation of PVC tube (every 1.5 mtr.)
5	Edilon Polymer Wedge	Accurate horizontal alignment of the rail
4	Edilon Primer 21	Bonding primer applied on primer US0WB
3	Edilon Primer US0WB	Pre-treatment primer applied on surface of strip, channel & rail
2	Signacover 280	Corrosion protective layer
1	Edilon Corkeaste VA-60 (N)	Elastic support and fastening of the rail
No.	Product	Remarks

This drawing has Copyright which is owned by edilon|sedra by and may not be reproduced in whole or part in any form whatsoever without prior written authority from edilon|sedra by Haarlem

edilon|sedra
 Nijverheidsweg 23, 2031 CN Haarlem
 PO Box 1000, 2003 BZ Haarlem, Holland
 Phone : +31 23 5310519
 Fax : +31 23 531051
 E-mail : mail@edilonsedra.com
 Site : www.edilonsedra.com

TOLERANCES in boxes:
 These tolerances originate from the requirements on installation, electrical insulation and/or mechanical durability of this specific design of EDILON Corkeaste® ERS

TOLERANCES marked with *:
 These tolerances refer to the construction of the channel and the position of the channel relative to Top Of Rail or Track Level, Track Axis and Track Gauge.

CHANNEL BOTTOM TOLERANCES:
 The bottom of the channel should be parallel to Track Level (either horizontal in straights or inclined in case of track cant / superelevation), while the surface should be accurate within 1mm in transversal direction (1500mm reference) and 2mm in longitudinal direction (1000mm reference). For the accurate position of the channel bottom, please refer to the channel depth (left and right) relative to Top Of Rail or Track Level.

NOTE:
 In case of two conflicting tolerances, the tighter tolerance applies.

PROJECT:
ProRail - BEA00008
Ingegooten Spoorstelsel
uitvoering EDILON

TITLE:
 EDILON
 ERS HR 54E1-MS type C
 system

STATUS:
 Standard Design

DATE: 02-07-2007
REF.: PVE

CHECKED BY:
 APPROVED BY:

DWG. NO.: 2007-0502
SCALE: 1:3

ART. CODE: -

DRAWING NO.: 2007-0701
REVISION: -
PAGE: -/1-

