

Het 2e leven van spoorstaven in een modulaire demontabele spoortraverse

HOOFDRAPPORT

MARTIJN ZEGERS

Versie 17 augustus 2018

Contactinformatie

Afstudeerder:

Martijn Zegers

Studentnummer: 500723411

E: martijn.zegers@hva.nl

M: +31 6 54696863

Afstudeerbegeleiders:

1^e begeleider HvA:

Dr. Ir. M.P. Horikx

m.p.horikx@hva.nl

2^e begeleider HvA:

Ing. J. Falek MSE

j.falek@hva.nl

Werkvelddeskundige:

Ir. A. van der Sluis

a.vdsluis@vanrossumbv.nl

Hogeschoolgegevens:

Hogeschool van Amsterdam

Adres: Weesperzijde 190, 1097 DZ Amsterdam

Telefoon : 020 5951111

Website: www.hva.nl

Faculteit: Techniek

Opleiding: Master Structural Engineering

Vakcode: Module 3.4 Proeve van bekwaamheid

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	1
1.1.	Aanleiding.....	2
1.2.	Doel van het onderzoek	3
1.3.	Onderzoek strategie	3
1.4.	Leeswijzer	5
2.	Literatuurstudie	7
2.1.	Duurzaamheid en circulariteit.....	7
2.2.	Spoorstaven.....	8
2.3.	Ontwerpeisen modulaire, demontabele en herbruikbare traverse	9
2.4.	Referentieproject tijdelijke traverse station Driebergen-Zeist.....	11
3.	Ontwerp traverse	13
3.1.	Uitgangspunten	13
3.2.	Variantenonderzoek constructieve onderdelen	13
3.3.	Bepaling voorkeursvariant	15
4.	Uitwerking voorkeursvariant in spoorstaven en in constructiestaal.....	17
4.1.	Variant in spoorstaven	17
4.1.1.	Modellering materiaaleigenschappen.....	17
4.1.2.	Doorsnede eigenschappen	19
4.1.3.	Belastingen	19
4.1.4.	Toetsing constructie	20
4.1.5.	Verbindingen vloer- en dak-elementen aan de vakwerkliggers.....	23
4.2.	Constructie traverse uitgevoerd in constructiestaal.....	25
4.2.1.	Modellering en berekening van de constructie	25
4.3.	Vergelijking varianten	26
5.	Berekening CO ₂ emissie	28
5.1.	CO ₂ emissie berekening variant (1)	29
5.2.	CO ₂ emissie berekening variant (2)	30
5.3.	Vergelijking CO ₂ -emissie's variant (1) en (2)	31
6.	Conclusies	34
7.	Aanbevelingen	36
	Begrippen & Symbolenlijst.....	37
	Bibliografie	38
	Bijlage 1 Mindmap	40

Bijlage 2	Constructief ontwerp traverse	41
Bijlage 3	Indeling vakwerkligger traverse	42
Bijlage 4	Varianten vloerconstructie	43
Bijlage 5	Beslissingsmatrix.....	45
Bijlage 6	Verbindingen vloer- en dak-elementen aan de vakwerkliggers.....	46

Voorwoord

Voor u ligt het onderzoeksrapport naar de mogelijke CO₂-winst die behaald zou kunnen worden wanneer gebruikte spoorstaven als constructieve elementen worden toegepast voor de bouw van een demontabele traverse.

Dit onderzoek is uitgevoerd als afsluitend onderdeel van de Opleiding “Master Structural Engineering” van de Hogeschool van Amsterdam.

Een integrale aanpak van bouw-gerelateerde onderwerpen wordt steeds meer een taak van constructief ontwerpers. Een constructie moet niet alleen sterk, stijf en stabiel zijn, ook sustainability speelt tegenwoordig een grote rol in de dagelijkse praktijk.

Sinds 1994 ben ik docent aan de Hogeschool Utrecht, waar ik medeverantwoordelijk ben, jonge mensen het prachtige vak van het bouwen bij te brengen.

Mijn “ouderwetse” HTS diploma Bouwkunde blijkt hiervoor tegenwoordig onvoldoende te zijn, daarom ben ik enkele jaren geleden aan deze studie begonnen om het vereiste Masterdiploma te halen.

De keuze van het onderwerp van dit onderzoek is ontstaan uit interesse over duurzaamheid. Enkele jaren geleden was dit voor mij uitsluitend iets wat door “mensen met grijze wollen sokken” bedacht was. Nu denk ik daar heel anders over. Een belangrijk item, maar hoe kun je aantonen hoe sustainable een constructie is? Door middel van dit onderzoek is de eerste stap hier naar toe gezet en hoop ik met het behalen van het diploma nog vele jonge studenten ook dit aspect van bouwconstructies te kunnen bijbrengen.

Dankzij experts heb ik over informatie kunnen beschikken die ik nodig had, hebben zij mij bij vragen de weg gewezen naar oplossingen.

Graag wil ik hiervoor bedanken: Dennis Roufs en Eric Brink van Railpro, zij stonden altijd klaar om me te voorzien van informatie over “oude verroeste” maar ook nieuwe spoorstaven met kopverharding, Bart Schotsman van ProRail hij gaf uitleg over korrelstructuren van staal, Jan-Pieter den Hollander van Bouwen met staal, hij kwam speciaal duurzaam op de fiets naar Zoetermeer om mij de ins- en out over EPD's uit te leggen. Ook wil ik mijn begeleiders Michiel Horikx en Jos Falek van de Hogeschool van Amsterdam en Anne van der Sluis, als werkveld deskundige bedanken voor de begeleiding.

De afronding van de masterstudie was zwaar en zonder hulp van mijn lieve vrouw Ursula haast onmogelijk geworden. Zij was mijn mentor, las alle deelverslagen, gaf er verbeterpunten voor aan en heeft mij de laatste weken enorm geholpen bij de afronding van dit rapport. Aan haar ben ik enorm veel dank verschuldigd.

Martijn Zegers

Maarsse, augustus 2018

Samenvatting

Uitputting van grondstoffen, klimaatveranderingen ten gevolge van het oplossen van de ozonlaag et cetera gaan in de toekomst een grote impact hebben ons leefklimaat. Op internationaal niveau wil men, met het klimaatverdrag van Parijs, onder andere de temperatuurstijging van het aardoppervlak, welke het gevolg is van aantasting van de ozonlaag door broeikasgassen, gaan beperken. Reductie van CO₂-uitstoot kan bij de transitie van een lineaire naar een circulaire economie hieraan een bijdrage leveren.

Ieder jaar bereiken kilometers spoorstaven de einde-levensduur-fase. Ten gevolge van slijtage en corrosie worden zij daarom projectmatig vervangen.

Het doel van dit onderzoek is te onderzoeken of deze spoorstaven gebruikt kunnen worden als constructief staal in een modulaire demontabele spoortraverse om hiermee een CO₂-winst te kunnen realiseren. De tijdelijke traverse is nodig bij het ombouwen van perrons van NS-stations in verband met spoorboekloos reizen.

De onderzoeksvraag van dit onderzoek luidt:

Hoe groot is de CO₂ winst bij toepassing van gebruikte spoorstaven ten opzichte van gebruik van nieuwe staalprofielen bij de bouw van een modulaire spoortraverse?

In het literatuuronderzoek zijn ontwerpeisen voor een spoortraverse, materiaaleigenschappen van spoorstaven en de gedegradeerde doorsnedegrootheden van de spoorstaven onderzocht.

Er is, uit een variantenstudie, een voorkeursvariant ontstaan voor het constructief ontwerp van de traverse, bestaande uit modulaire vloer- en dak-elementen, die op vlakke vakwerkliggers worden opgelegd.

Om de CO₂-winst te kunnen berekenen, is de voorkeursvariant constructief uitgewerkt in een variant met spoorstaven en een variant met constructiestaal. Voor beiden is de CO₂-emissie berekend.

Er blijkt bij de variant met spoorstaven 40% meer staal nodig te zijn dan bij de variant met constructiestaal. Doordat de spoorstaven ten gevolge van slijtage en corrosie de einde-levensduur-fase hebben bereikt, heeft iedere spoorstaaf een andere doorsnede. Veel laswerk is nodig om de maatvast constructie te realiseren, die bij demontabel bouwen vereist is.

Door gebrek aan gegevens over de restwaarde van de spoorstaven aan het einde van het eerste leven, is de grootte van de CO₂-winst onduidelijk. Middels een berekening met een variabele restwaarde, is in het ongunstigste geval toch nog een kleine CO₂-winst te behalen.

Deconstructief onderzoek is nodig om aannamen over de staaleigenschappen van de gebruikte spoorstaven te kunnen controleren. Ook zijn controles nodig op onderdelen die tijdens optimalisatieslagen zijn gewijzigd. Optimalisatie van de CO₂-emissie kan bereikt worden door transport, waarvoor door de RDW ontheffing kan verlenen.

1. Inleiding

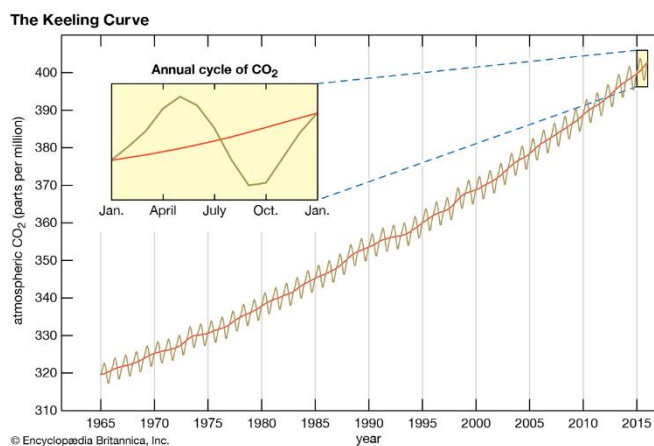
'Bij alles wat de mens gebruikt om te overleven en om het leven aangenaam te maken wordt gebruik gemaakt van stoffen of producten die uiteindelijk door de aarde (en zonlicht) zijn voortgebracht. De mens gebruikt de aarde, de grondstoffen, de lucht, het water, het zonlicht en levende organismen, al of niet na bewerking en manipulatie voor zijn eigen doeleinden.

Meestal stonden mensen er niet bij stil dat de voorraden van wat zij gebruikten op konden raken en dat grond, lucht en water zodanig vervuild konden geraken dat ze er zelf last van zouden krijgen. Deze fout heeft in de geschiedenis van de mensheid al meerdere keren tot humanitaire rampen en oorlogen geleid.' (Diamond, 2004).

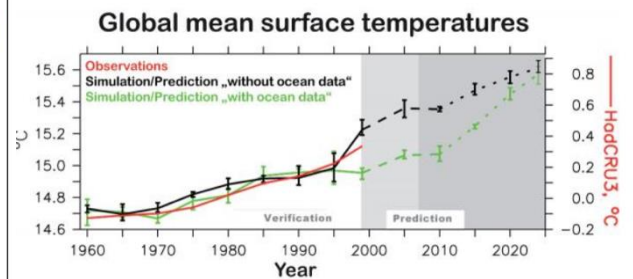
Hetzelfde probleem doet zich nu voor op wereldschaal. De mens belast de aarde zodanig dat er allerlei problemen ontstaan. De biodiversiteit gaat achteruit, bijen verdwijnen, grondstoffen raken uitgeput, de CO₂ uitstoot is te hoog, ontbossing, verwoestijning, en ga zo maar door.

Wie de berichten van milieu-organisaties en wetenschappelijk onderzoek een beetje bijhoudt, komt al snel tot de conclusie dat het hard de verkeerde kant op gaat voor de mensheid. (Janssens, 2014).

De CO₂-uitstoot ligt te grondslag aan de *Global Warming Potential* of wel het broeikaseffect, waardoor de temperatuur aan het aardoppervlak en daarmee ook de zeespiegel stijgt. In Figuur 1-1 en Figuur 1-2 is de relatie tussen CO₂-uitstoot en de temperatuurstijging van het aardoppervlak weergegeven.



Figuur 1-1: Keeling curve (Keeling, 2018)



Figuur 1-2 : Temperatuurstijging aardoppervlak (Leibniz institute of Marine Sciences, 2008)

Op nationaal en internationaal niveau is beleid ontwikkeld om de CO₂-uitstoot te reduceren, bijvoorbeeld door transitie van een lineaire naar een circulaire economie, waardoor minder grondstoffen worden gebruikt door hergebruik van producten.

1.1. Aanleiding

In Nederland is ProRail vanuit de overheid aangewezen als partij om de Nederlandse burgers een veilig vervoer over het Nederlandse spoorwegennet te garanderen. Uit milieutechnische oogpunten en om dichtslibben van de openbare wegen in en rondom de grote steden te beperken, wordt het gebruik van openbaar vervoer gestimuleerd.

Door een hoge frequentie van mogelijke treinreizen aan te bieden, wordt reizen per trein steeds aantrekkelijker gemaakt voor forenzen en overige gebruikers.

De NS willen in 2020 spoorboek-loos reizen. Verder zullen hogesnelheidstrajecten worden gerealiseerd. Hiermee wordt de reistijd voor de reizigers zo kort mogelijk gehouden.

Door deze toekomstige veranderingen, zullen stations omgebouwd moeten worden, waarbij gescheiden banen komen voor treinen met verschillende snelheden en treinen met verschillende stopplaatsen, Figuur 1-3.



Figuur 1-3: Perronindeling nieuwe stijl (Treinreiziger.nl, 2009)

Behalve dat het spoorwegennet wordt gebruikt voor personenvervoer wordt het ook voor het veel zwaardere goederenvervoer gebruikt.

Door het intensieve en zware gebruik van het spoor, vindt slijtage door de treinwielen op de spoorstaven plaats. Voor treinen, die met hoge snelheden het spoor gebruiken, kan de slijtage voor een onveilige situatie zorgen.

Voor trajecten waar de slijtage-normen naderen wordt een vervangingsplan opgesteld. Kortom spoorstaven hebben niet het eeuwige leven als spoorstaaf. Jaarlijks komt er een hoeveelheid spoorstaven van ca 250 – 300 km vrij uit vervangingsprojecten. Van deze hoeveelheid wordt ca 20 % hergebruikt, de rest (ca 200 km) wordt in stukken geknipt en gaat als schroot naar de hoogovens voor recycling.

Voor de recycling van de spoorstaven tot nieuw staal is veel energie (warmte) nodig, terwijl het staal nog goede eigenschappen bezit.

1.2. Doel van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is om vast te stellen of het mogelijk is om vrijkomende spoorstaven een constructieve functie te geven, in een tijdelijke spoortraverse bij de transitie van stations.

In het kader van “Nederland Circulair in 2050” (Ministerie Economische zaken) is onderzocht of en hoeveel CO₂-reductie behaald kan worden.

Aangezien de CO₂-last gebaseerd is op een Life Cycle Analysis, LCA, dus van bouw tot en met sloop, is een herbruikbaar product veel gunstiger dan een product voor éénmalig gebruik. In het onderzoek is hierdoor ook de herbruikbaarheid van een modulaire spoortraverse onderzocht.

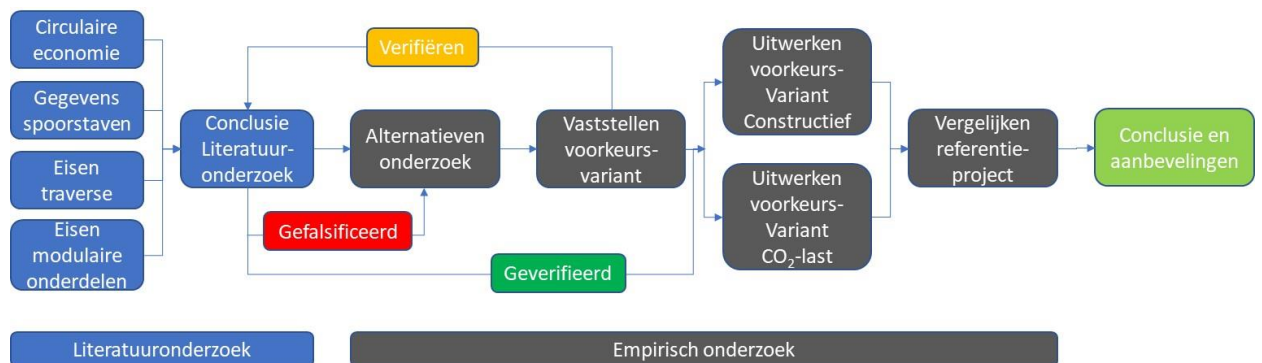
De spoortraverse bij station Driebergen-Zeist is als referentieproject gebruikt.

Dit heeft geleid tot de hoofdvraag voor dit onderzoek:

Hoe groot is de CO₂ winst bij toepassing van gebruikte spoorstaven ten opzichte van gebruik van nieuwe staalprofielen bij de bouw van een modulaire spoortraverse?

1.3. Onderzoek strategie

Om de hoofdvraag te beantwoorden is een mindmap gemaakt, waarin de aspecten zijn opgesomd, die een relatie hebben met de hoofdvraag. De aspecten uit de mindmap zijn gerubriceerd. Hieruit is het onderzoekschema Figuur 1-4 ontstaan, dat als leidraad heeft gefungeerd voor dit onderzoek. De mindmap is bijgevoegd in bijlage 1.



Figuur 1-4: Onderzoekschema

Om te kunnen starten is een literatuuronderzoek uitgevoerd.

Het literatuuronderzoek heeft zich op de volgende hoofdthema's gericht: duurzaamheid en circulaire economie, spoorstaven, traverse, demontabel bouwen. Dit zijn linkse vier blokken uit Figuur 1-4.

Per hoofdthema zijn deelvragen opgesteld, die leiden tot de beantwoording van de hoofdvraag en om het onderzoek af te bakenen.

Voor het hoofdthema duurzaamheid en circulaire economie zijn de belangrijkste deelvragen:

- Wat is de reden voor de transitie van een lineaire naar een circulaire economie?
- Welke rol spelen CO₂-emissies hierbij?
- Hoe kan men CO₂-emissies kwantificeren?

Voor het hoofdthema spoorstaven zijn de belangrijkste deelvragen:

- Kunnen alle spoorstaven die vervangen worden voor constructieve doeleinden worden gebruikt?
- Welke doorsnededegradatie hebben de spoorstaven uit een groot vervangingsproject?
- Wat zijn de materiaaleigenschappen van het staal waarvan spoorstaven gemaakt zijn?

Voor het hoofdthema traverse is de belangrijkste deelvraag:

- Welke minimale eisen voor afmetingen en belastingen gelden voor een tijdelijke spoortraversematen?

Voor het hoofdthema demontabel bouwen is de belangrijkste deelvraag:

- Aan welke eisen moet de traverse voldoen om demontabel en herbruikbaar te zijn?

Hierna is, met de conclusies uit het literatuuronderzoek in het achterhoofd, gestart met het empirisch onderzoek. Om CO₂-winst, zie hoofdvraag, te bepalen moet de traverse opgebouwd uit spoorstaven vergeleken worden met een referentie traverse. Hierdoor zijn de volgende hoofdthema's voor het empirisch onderzoek vastgesteld met bijbehorende belangrijkste deelvragen:

Voor het hoofdthema ontwerp tijdelijke traverse zijn de belangrijkste deelvragen:

- Uit welke onderdelen bestaat de tijdelijke traverse die voldoet aan de eisen uit het literatuuronderzoek?
- Welke varianten zijn hiervoor mogelijk?
- Hoe wordt de voorkeursvariant bepaald?

Voor het hoofdthema constructie traverse opgebouwd uit spoorstaven zijn de belangrijkste deelvragen:

- Welke mechanische eigenschappen kunnen toegekend worden aan spoorstaven staal?
- Welke doorsnedegrootheden mogen worden toegekend aan de gedegradeerde spoorstaven?
- Hoeveel spoorstaven zijn er minimaal nodig voor de constructie van de traverse?

Voor het hoofdthema constructie traverse opgebouwd met constructiestaal is de belangrijkste deelvraag:

- Hoeveel kilogram constructiestaal is nodig voor een geoptimaliseerde traverse die als referentie dient?

Voor het hoofdthema impact CO₂-emissies van de varianten zijn de belangrijkste deelvragen:

- Wat zijn de CO₂-emissies van beide varianten voor eenmalig en voor hergebruik?
- Heeft het aantal malen hergebruik invloed op het antwoord van de hoofdvraag?

Na het beantwoorden van deze deelvragen zijn conclusies getrokken en aanbevelingen gegeven om tot een beslissing te komen voor spoorstaven wel of geen 2^e leven gegund moeten worden in een modulaire, demontabele tijdelijke spoortraverse.

Het onderzoek heeft zich beperkt tot de overspanning over het nieuw te bouwen eilandperron met de naastgelegen sporen. De portalen, die de traverse ondersteunen, zijn in het ontwerp tijdelijke traverse overgenomen uit het referentieproject “tijdelijke traverse station Driebergen-Zeist”. De invloed van de ondersteuning is meegenomen in modellering, maar deze zijn verder niet in het onderzoek meegenomen in de constructieve uitwerkingen en de CO₂-emissieanalyse. Het referentieproject “tijdelijke traverse station Driebergen-Zeist” heeft een tussenondersteuning, ongeveer halverwege de overspanning. Voor het vaststellen van de maten kon dit referentieproject gebruikt worden, echter voor de constructieve uitwerking en voor de analyse van de CO₂-emissie zou dit geen goede referentie zijn.

Het ontwerp van een tijdelijke herbruikbare modulaire traverse is uitsluitend geslaagd, indien de elementen waaruit de traverse wordt opgebouwd op een relatief eenvoudige wijze met elkaar verbonden kunnen worden. Van de belangrijkste verbindingen zijn ontwerpdetails gemaakt. Omdat de detaillering nauwelijks tot geen invloed heeft op de beantwoording van de hoofdvraag, zijn geen detailberekeningen gemaakt voor de dikte van lassen, lasplaten et cetera.

1.4. Leeswijzer

Dit hoofdrapport heeft tot doel, middels een helicopterview, de lezer inzicht te geven in het onderzoek ter beantwoording van de hoofdvraag:

Hoe groot is de CO₂ - winst bij toepassing van gebruikte spoorstaven ten opzichte van gebruik van nieuwe staalprofielen bij de bouw van een modulaire spoortraverse?

Voor de verantwoording van de beantwoording van de hoofdvraag zijn de volgende deelrapporten te raadplegen:

- D1. Plan van aanpak
- D2. Literatuuronderzoek
- D3. Ontwerp traverse
- D4. Constructieve uitwerking voorkeursvariant in spoorstaven
- D5. Constructieve uitwerking voorkeursvariant in constructiestaal
- D6. Analyse CO₂-emissie

In hoofdstuk 2 worden de onderwerpen: duurzaamheid en circulariteit, slijtage en materiaaleigenschappen van spoorstaven, eisen aan een modulaire en demontabel

traverse en het referentieproject uit het deelrapport D2 Literatuuronderzoek samengevat.

In hoofdstuk 3 zijn op basis van het literatuuronderzoek en het referentieproject de definitieve maten van de traverse vastgelegd. Daarna zijn voor de constructieve onderdelen, verschillende varianten opgesteld, waarna met een beslissingsmatrix de voorkeursvariant is bepaald.

Hoofdstuk 4 bevat de gevolgde aanpak, gekozen modellering, rekenmethodes en de resultaten van de berekeningen van de voorkeursvariant in spoorstaven en in staal. Verder zijn, van de belangrijkste verbindingen, principedetails weergegeven voor de variant met spoorstaven.

Na een uitleg van de berekeningsmethode, zijn in hoofdstuk 5 de berekende CO₂-emissies tussen de varianten in spoorstaven en in constructiestaal met elkaar vergeleken en zijn de resultaten gevisualiseerd.

Het onderzoek wordt afgesloten met hoofdstuk 6 en 7, waarin achtereenvolgend de conclusies uit het onderzoek worden beschreven en aanbevelingen worden gedaan.

2. Literatuurstudie

Om inzicht te creëren in de diverse aspecten, die een rol spelen voor het kunnen beantwoorden van de onderzoeksvraag, is een literatuuronderzoek verricht (zie deelrapport 2) waarbij gekeken is naar de volgende 4 hoofdthema's:

- Duurzaamheid en circulariteit.
- Spoorstaven.
- Spoortraverse.
- Demontabel bouwen.

Project: "tijdelijke spoortraverse station Driebergen – Zeist" is bezocht, opgemeten en bestudeerd ter vergelijking aan de traverse uit het onderzoek.

2.1. Duurzaamheid en circulariteit

Broeikasgassen, waaronder CO₂ valt, zijn zogenaamde Global Warming Potentials GWP, die de opwarming van de aarde veroorzaken. In diverse internationale en nationale akkoorden zijn de volgende concrete doelstellingen vastgelegd ter beperking van de opwarming van de aarde:

- 20% minder CO₂-uitstoot ten opzichte van 1990.
- 20% minder energieverbruik.
- 20% van het totale energiegebruik moet afkomstig zijn uit hernieuwbare energie, zoals wind- en zonne-energie.

Om de reductie van de CO₂-uitstoot te bereiken, is onder andere de transitie van een lineaire naar een circulaire economie vastgelegd in het rijksbrede programma *Nederland Circulair in 2050* (Ministerie Economische zaken).

Voor de bouwpraktijk wilt dit zeggen dat, na de levensduur van een bouwwerk, bruikbare bouwdelen worden gedemonteerd, opgewaardeerd en opnieuw worden gebruikt. Overige bouwdelen worden niet meer gesloopt en als afval opgeslagen maar gerecycled met duurzame energie zodat deze opnieuw als grondstof gebruikt kunnen worden: "Cradle to Cradle".

Naast opwarming van de aarde door GWP's zijn er nog circa 10 andere categorieën voor milieueffecten opgesteld zoals bijvoorbeeld voor uitstoot schadelijke stoffen in lucht, water en bodem door Human Toxicity Potential, HTP's.

De milieukostenindicatie-waarde, MKI-waarde, is een internationale waarde, om alle milieueffecten in geld uit te drukken. Op deze wijze kan een beeld gevormd worden van de milieuschade van bijvoorbeeld een gebouw gedurende zijn levensduur.

Voor de berekening van deze waarde zijn verschillende softwarepakketten ontwikkeld. Echter hierbij worden naast CO₂, ook alle andere milieueffecten meegewogen. Deze pakketten zijn overwogen te gebruiken maar uiteindelijk niet gebruikt voor de CO₂ berekening in dit onderzoek. De berekeningsmethode van de NEN-EN 15804 is hiervoor gebruikt met als de ketenanalyse (DHV, 2010), als voorbeeld .

2.2. Spoorstaven

De functie van de spoorstaaf is een langdurige, veilige en stabiele geleiding van treinen van A naar B. Hiervoor is een speciaal Vignola profiel ontwikkeld met een staalsoort, speciaal voor spoorstaven, R260Mn.

Momenteel bestaat 67% van het Nederlandse spoorwegennet uit het Vignola profiel type 54^{E1}. Van de nieuw toe te passen spoorstaven is meer dan 90% van dit type. Daarom is het onderzoek op dit type spoorstaaf gericht.

ProRail beheert een database, waarin alle spoorstaven zijn opgenomen met unieke nummers, locatie, leeftijd en slijtage gegevens. Met behulp van deze database worden vervangingsprojecten in de markt gezet. De redenen van de vervangingsprojecten kunnen zijn:

- Einde levensduur
- Aanpassingen aan het spoor
- Instandhouding van het spoor (PGO, Prestatie Gericht Onderhoud)

In document OHD00033 “Instandhoudingsspecificaties” (ProRail, 2015) is, de te realiseren levensduur van onder andere de spoorstaven vastgelegd aan de hand van de toetsing aan de bodemwaarden (BW) en de veiligheidswaarde (VW).

Document IHD00018 “Instandhoudingsdocument” (ProRail Productbeheer, 2005) geeft de definities van de Bodemwaarde en de Veiligheidswaarde.

Bodemwaarde BW: kwaliteitswaarde als minimum norm door ProRail gesteld, welke niet mag worden gepasseerd.

Veiligheidswaarde VW: Waarde welke onder geen beding mag worden gepasseerd omdat daarmee de veilige berijdbaarheid van het spoor in het geding komt.

Met behulp van document RLN00036-V002 “Spoorstaafgebreken” (ProRail, 2012) worden breuken, scheuren en beschadigingen geclassificeerd.

Spoorstaafgebreken worden in de volgende categorieën ingedeeld:

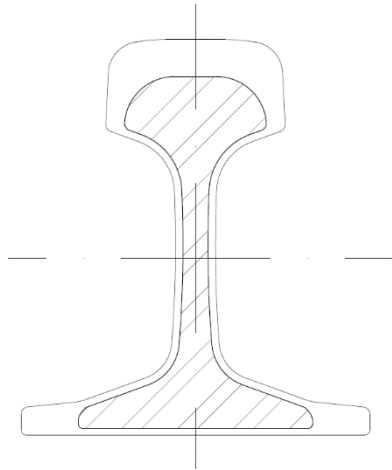
Beschadigde spoorstaaf: noch gescheurd, noch gebroken maar andere gebreken die zich over het algemeen bevinden aan de oppervlakte van de spoorstaaf.

Spoorstaaf met scheuren: één of meerdere scheurtjes, zichtbaar of onzichtbaar welke binnen afzienbare tijd tot een breuk kunnen leiden.

Gebroken spoorstaaf: een spoorstaaf die in 2 of meerdere delen uiteengevallen is of waarvan een stuk heeft losgelaten waardoor in het loopvlak een hiaat is ontstaan met een lengte meer dan 50 mm en een diepte van meer dan 10 mm.

Uitsluitend spoorstaven, categorie *Beschadigde spoorstaaf*, kunnen in aanmerking komen voor hergebruik in constructieve toepassingen.

De *beschadigde spoorstaaf* is onderhevig aan slijtage en corrosie, waardoor de doorsnede van de spoorstaven is afgenomen en niet meer voldoet aan de bodem- of veiligheidswaarde, die ProRail aan de spoorstaven stelt. (ProRail, 2012)



Bij de bepaling van de degradatie wordt een slijtage van de railkop aangehouden van 15 mm rondom. Voor corrosie worden resterende maten voor lijfdikte van 12 mm, voetdikte van 7 mm en voetbreedte van 94 mm aangehouden bij de berekening van de nieuwe doorsnede. In Figuur 2-1 worden de oorspronkelijke en de gedegradeerde doorsnede weergegeven.

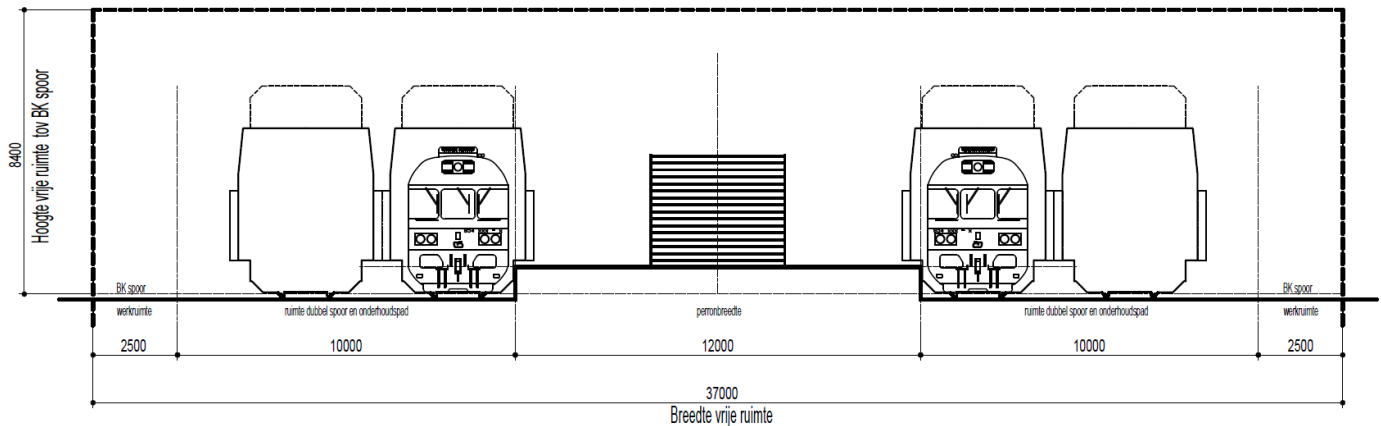
Figuur 2-1: Doorsnede gedegradeerde spoorstaaf

De spoorstaven die vrijkomen bij grote vervangingsprojecten zijn vrijwel allemaal van de staalsoort R260Mn. Railstaal R260Mn heeft een andere chemische samenstelling dan constructiestaal, hierdoor zijn de mechanische eigenschappen van beide staalsoorten niet aan elkaar gelijk. Dit wordt nader toegelicht in hoofdstuk 4. Het slijpen van de spoorstaven (onderhoud) en de dynamische belastingen (gebruik), waarop de spoorstaven onderhevig zijn, kunnen een verandering van de korrelstructuur van het staal veroorzaken en daarmee een degradatie van bepaalde mechanische eigenschappen. Uit een interview met een expert van ProRail, 25 juli 2018 is naar voren gekomen, dat het slijpen van spoorstaven slechts invloed heeft op de oppervlakte van de spoorstaaf en dat na enige treinbewegingen de veranderde structuur al weer is afgesleten. De passages van de treinen veroorzaken hoge geconcentreerde piekspanningen, echter de gemiddelde spanningen blijven erg laag. Wat de invloed van beide aspecten is op de materiaaleigenschappen is voor de railbranche niet belangrijk genoeg, waardoor tot op heden geen nader onderzoek is op dit gebied is uitgevoerd.

2.3. Ontwerpeisen modulaire, demontabele en herbruikbare traverse

Gedurende de bouw van het eilandperron en de naast gelegen sporen is een tijdelijke traverse noodzakelijk om de perrons bij de tijdelijke sporen te kunnen bereiken. Voor het profiel van vrije ruimte onder de traverse is rekening gehouden met de totale breedte van het eilandperron met aan iedere zijde een dubbel spoor en 2,5 meter werkruimte. De hoogte is bepaald ten opzichte van de bovenkant spoor, BK spoor, en is afgeleid van de hoogte van de te maken portalen voor de hoogspanningsleidingen verhoogd met een werkhoogte van 2,5 meter. Voor de doorbuiging van de traverse is 0,1 meter aangehouden. In Figuur 2-2 is het profiel van vrije ruimte gevisualiseerd.

De vrije doorgang van de traverse is vastgesteld op een breedte van 3,5 m en een hoogte van 3,0 m.



Figuur 2-2: Profiel van vrije ruimte onder de traverse.

Tabel 2-1: Overzicht van maten voor het ontwerp de traverse

Onderdeel	Literatuuronderzoek
Vrije breedte onder de traverse	37,0 m
Vrije hoogte onder de traverse tov bk spoor	8,4 m
Vrije inwendige breedte van de traverse	4,0 m
Vrije inwendige hoogte van de traverse	3,0 m
Vrije breedte van het stijgpunt trap	4,0 m

Voor opgelegde belastingen hanteert ProRail de NEN-EN-1991-1-1 NB, voor de traverse geldt gebruiksklasse C5. De belastingen zijn weergegeven in Tabel 2-2 .

Tabel 2-2: Belastingen op de traverse

Belastingen op traverse :								
	Afkorting	Dak	Vloer	Gevels	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2	opm.
		kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²				
Permanent	P_{Gk}	wordt later vast gesteld			1,0	1,0	1,0	
Opgelegd vloer	P_{Qk}		5,00		0,6	0,7	0,6	wordt gezien als vluchtroute
Sneeuw	$P_{Qk;sn}$	0,56			0,0	0,2	0,0	
Wind	$P_{Qk;w}(12,5)$	1,09	1,09	1,09	0,0	0,2	0,0	

Omdat grote mensenmassa's gelijktijdig de traverse moeten kunnen gebruiken, is de voorwaarde van ProRail dat de traverse onder gevolgklasse CC 3 valt, dus het hoogste risico met groot gevolg.

In de literatuur komt de term IFD-bouwen veelvuldig voor. IFD staat voor Industrieel Flexibel en Demontabel. Hiervoor is (Bouwen met staal, 2001) bestudeerd.

Met *industrieel* wordt bedoeld dat elementen in fabrieken worden geproduceerd en op bouwplaatsen worden geassembleerd. Hierbij wordt ook vaak de term clean, lean en mean gebruikt. Hiermee wordt bedoeld:

- clean: Werken in een geoptimaliseerde omgeving,
- Lean: Geoptimaliseerde processen,
- Mean: met zo min mogelijk verspilling.

Uit presentaties bij STUfib van IMD raadgevend ingenieurs over demontabel bouwen bleek, dat voor de efficiëntie de modules zo groot mogelijk gekozen moeten worden. Om de industriële modules te kunnen assembleren en te demonteren voor meervoudig gebruik moeten de verbindingen:

- snel en eenvoudig te monteren en demonteren zijn
- bereikbaar zijn en blijven
- niet beschadigd worden bij monteren en demonteren

Onder flexibel wordt verstaan dat het bouwwerk snel kan worden aangepast aan de behoeften van de gebruiker. Dit is voor de traverse op dit moment NIET relevant.

Transport bepaalt vaak de grootte van de modules. De RijksDienst voor Wegverkeer RDW heeft de maximale afmetingen van voertuigen met ladingen bepaald. (RDW, 2012). Buiten deze afmetingen moet een vervoerder ontheffing vragen of kan deze gebruik maken van een doorlopende ontheffing.

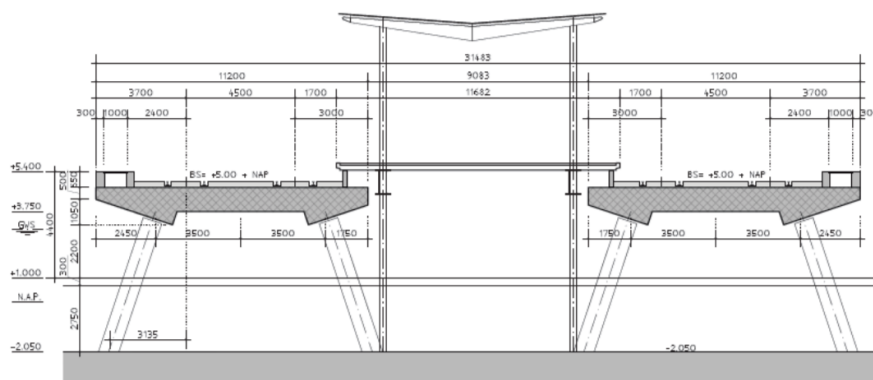
Uitgaande dat er zonder ontheffing getransporteerd wordt, zijn de maximale te transporteren netto afmetingen: L x B x H = 15,2 x 2,5 x 3,3 m.

2.4. Referentieproject tijdelijke traverse station Driebergen-Zeist

Op dit moment wordt het station Driebergen-Zeist omgebouwd en voorzien van een eilandperron. Verschil met een standaard eilandperron is de verhoogde ligging van het perron met verlaagd stationsgebied. Zie [animatie van het stationsgebied Driebergen-Zeist](#). (stationsgebied Driebergen-Zeist, 2018) (Arcadis, 2011)

In Figuur 2-3 is de doorsnede van de nieuwe sporen en perrons weergegeven. Te zien is het eiland perron met overkapping en 2 maal 2 sporen. De aan de perrons gelegen sporen voor de stoptreinen en de 2 buitenste sporen voor de intercity's. Het perron heeft in het midden een vide voor trappen. De trappen verbinden het lagergelegen stationsgebied met de perrons. Ter plaatse van de vide is ruimte ontstaan voor een tussensteunpunt voor de traverse.

Omdat dit specifiek het geval is voor de situatie van Driebergen-Zeist, wordt hier bij het ontwerp van de modulaire tijdelijke traverse geen rekening mee gehouden.



Figuur 2-3: Doorsnede nieuwe situatie perron met spoordekken. (Arcadis, 2011)

Om tijdens de realisatie van het nieuwe perron met sporen de functionaliteit van het bestaande station te waarborgen is een tijdelijke traverse gebouwd. Zie Figuur 2-4.



Figuur 2-4: Foto tijdelijke traverse Driebergen-Zeist

In maart 2018 zijn de maten van de tijdelijke traverse opgemeten.

3. Ontwerp traverse

De basis voor het ontwerp van de modulaire demontabele traverse zijn de conclusies uit de literatuurstudie.

In dit hoofdstuk zijn deze conclusies gebruikt om de definitieve afmetingen van de traverse te bepalen. Hieruit is een ontwerp voor de modulaire demontabele traverse ontstaan, gebaseerd op het referentieproject. Vervolgens zijn de definitieve belastingen op de traverse en de grootte van de modulaire elementen vastgesteld. In deelrapport 3, Ontwerp Traverse, is het gehele ontwerpproces, om tot een voorkeursvariant te komen, beschreven. Tekeningen van het ontwerp zijn te vinden in bijlage 2.

3.1. Uitgangspunten

In het literatuuronderzoek zijn conclusies getrokken, die betrekking hebben op: de afmetingen van een tijdelijke traverse, de belastingen die op een traverse kunnen werken en de afmetingen en gewichten van vervoer over de weg .

De globale afmetingen van een spoortraverse, die voor een tijdelijke situatie bestemd is, zijn weergegeven in Figuur 2-3.

Deze afmetingen zijn vergeleken met het referentieproject “tijdelijke traverse station Driebergen-Zeist”. De conclusies uit de vergelijking staan vermeld in Tabel 3-1.

Tabel 3-1: Afmetingen ontwerp traverse, literatuuronderzoek en referentieproject

Onderdeel	Literatuuronderzoek	Opgemeten Driebergen-Zeist	Ontwerp
Vrije breedte onder de traverse	37,0 m	33,5 m	37,0 m
Vrije hoogte onder de traverse tov bk spoor	8,4 m	8,8 m	8,4 m
Vrije inwendige breedte van de traverse	4,0 m	3,7 m	3,8 m
Vrije inwendige hoogte van de traverse	3,0 m	3,4 m	3,4 m
Vrije breedte van het stijgpunt	4,0 m	3,8 m	3,8 m

Significant afwijkend is de breedte onder de traverse. Dit is het gevolg van een aangepaste fasering in de situatie in Driebergen-Zeist. Zie hiervoor deelrapport 3 Ontwerp traverse. Omdat het station Driebergen-Zeist verhoogd wordt aangelegd is ook de hoogte onder de traverse is voor deze situatie groter.

3.2. Variantenonderzoek constructieve onderdelen

De constructieve onderdelen van de traverse zijn gepositioneerd in de vlakken van de vloer, het dak en de gevel. Voor deze constructieve onderdelen zijn alternatieven bedacht. Aan het einde van deelrapport 3 worden zij met elkaar vergeleken om tot een voorkeursvariant te komen.

Als eerst zijn de constructieve alternatieven van de gevel onderzocht. In de vlakken van de gevels moet de vrije breedte onder de traverse overspannen worden met langsliggers. Deze zijn hierdoor in grote mate bepalend voor het ontwerp. De

alternatieven van het dak en de vloer zijn afhankelijk van de keuze van de langsliggers. Daarom zijn eerst varianten voor de langsliggers bepaald en op basis daarvan varianten voor de vloer en het dak.

Langsliggers

De langsliggers moeten een vrije overspanning kunnen halen van 37,0 meter. In staal komen voor deze overspanning de volgende alternatieven in aanmerking: vlakke vakwerkliggers, ruimtelijke vakwerkliggers, volle wandbogen, vakwerkbogen. De overspannings- en hoogtematen voor de langsliggers zijn bepaald met schattingsregels voor overspannings- constructies afkomstig uit het boek: Tabellen voor bouw- en waterbouwkunde (R.Blok, 2014). Omdat de langsliggers in de gevels moeten worden geïntegreerd is gekozen voor vlakke vakwerkliggers met een hoogte van circa 3700 mm. Een helling van de diagonalen is het gunstigst bij een hoek tussen 40° en 50°. Bij een indeling van de lengte in 8 tot 12 vakken voldoet de helling aan dit gegeven, zie [bijlage 3](#).

Vloerconstructie

Het lijf van een spoorstaaf is relatief dik, 16 – 20 mm, bij een totale hoogte van de spoorstaaf van 160 mm. Er zit dus veel materiaal rond de neutrale lijn van de doorsnede. Buigende momenten moeten daarom zoveel mogelijk worden voorkomen. Hierdoor zijn de opleggingen van de vloerliggers gepositioneerd in de knopen van de vakwerkliggers.

Onderzocht zijn houten vloeren (1), massieve betonvloeren (2) en staalplaat-betonvloeren (3).

Vanwege het demontabel bouwen van de traverse zullen ook deze onderdelen modulair gefabriceerd moeten worden.

Voor elk vloertype zijn 2 of meer varianten opgesteld, waarbij gekeken is naar de overspanningsrichting en de mogelijkheid om een overstek te creëren waardoor de vloer eventueel slanker uitgevoerd zou kunnen worden, [bijlage 4](#).

Dakconstructie

De dakconstructie is vergelijkbaar met de vloerconstructie.

Omdat er behalve de waterdichtheid nauwelijks eisen aan het dak gesteld worden, zoals geen isolerende, geen warmte-accumulatieve eisen en nauwelijks een draagfunctie, komt hier een zo licht en eenvoudig mogelijke constructie het meest tot zijn recht.

Hier zijn de mogelijkheden houten daken (1) en staalplaat daken, zowel in een “koud dak-” (2) als in een “warm dak-” (3) variant, onderzocht. Omdat het isoleren bij een spoortraverse niet nodig is en alleen extra kosten met zich mee brengt, valt de “warm dak-” (3) variant af.

3.3. Bepaling voorkeursvariant

Voor het bepalen van de voorkeursvariant zijn de opties voor de constructieve onderdelen langsliggers, vloer en dak met elkaar gekoppeld.

De langsliggers (vakwerkliggers) kunnen opgedeeld worden in n vakken, waarbij $8 \leq n \leq 12$, dus 5 opties.

Voor de vloer zijn als opties twee houten vloeren, H1 en H2, drie massieve betonvloeren, B1.1, B1.2 en B2, en drie staal-betonvloeren, BS1.1, BS1.2 en BS2, bekeken.

Voor het dak zijn de opties hout en staal onderzocht.

De keuze voor het aantal vakken n voor de vakwerkligger heeft uitsluitend invloed op het gewicht van de massieve en staal-betonvloeren bij de opties B1.1, B1.2, SB1.1 en SB1.2 maar niet op H1, H2, B2 en SB2, dit ligt aan de gekozen overspanningsrichting. Een kleine 'n' geeft een grote tussenlengte, waardoor bij de bovenrand van de vakwerkligger een grotere kniklengte ontstaat.

Om in één oogopslag de juiste combinatie te kiezen, is daarom niet mogelijk.

Hierdoor is er een beslissingsmatrix, Tabel 3-2, opgesteld.

Er is gekozen de combinatie van opties te beoordelen op de volgende 4 aspecten:

- Gewicht van het element
- Gebruik spoorstaven
- De kans en de mogelijkheid om de constructie te optimaliseren
- Uitvoeringsaspecten en gebruikscomfort

Aan de aspecten worden wegingsfactoren toegekend. Voor de onderbouwing zie deelrapport 3. Voor de beoordeling is gekozen voor het systeem:

- neutraal (0 punten); positief (1 punt); negatief (-1 punt)

Tabel 3-2: Beslissingsmatrix; In *bijlage 5* vergroot weergegeven

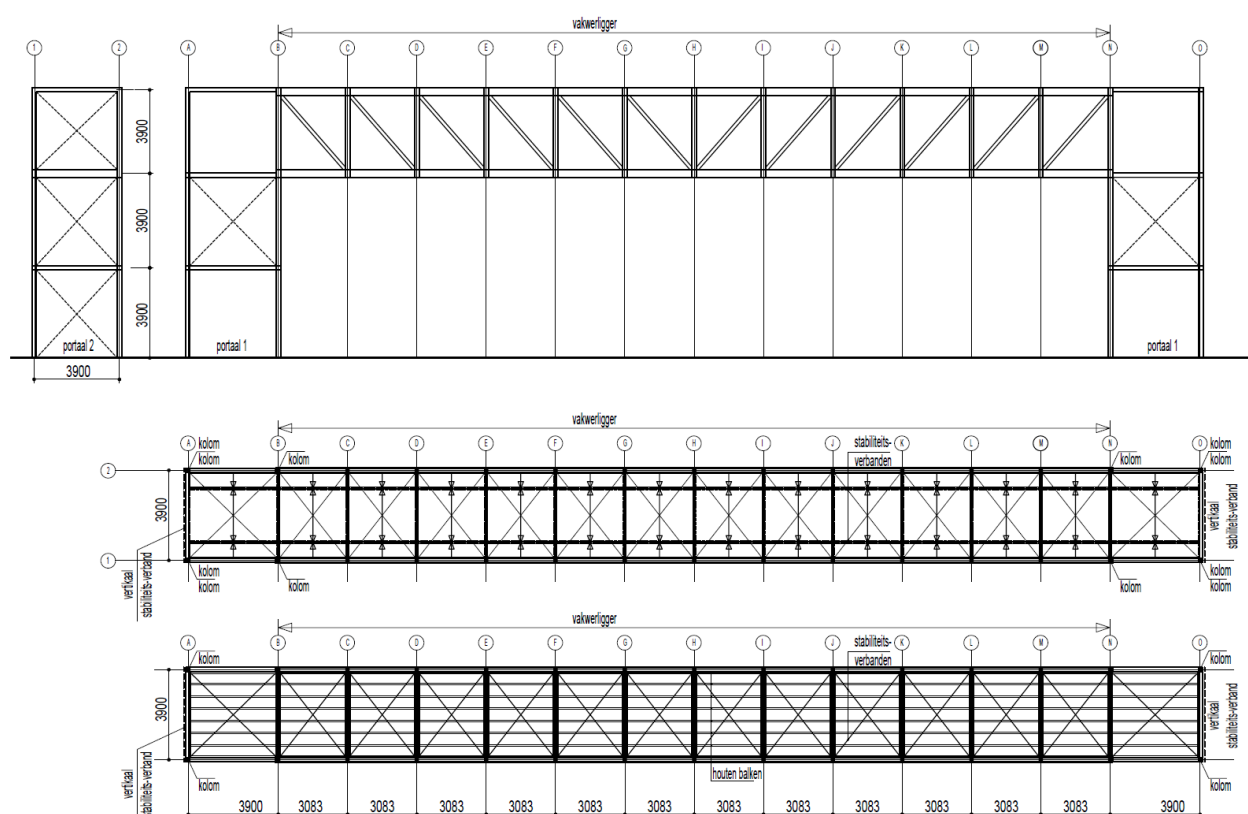
Beslissingsmatrix																									
optie	n=8				n=9				n=10				n=11				n=12								
Lv [m]	4625				4111				3700				3364				3083								
helling diagon. [α°]	40,1				43,5				46,5				49,2				51,7								
Σ lengte staven [m]	157				164				171				177				184								
%	100%				104%				109%				113%				117%								
	gewicht elementen		staaf lengte		kans en mogelijkheid optimalisatie		uitvoering en comfort		gewicht elementen		staaf lengte		kans en mogelijkheid optimalisatie		uitvoering en comfort		gewicht elementen		staaf lengte		kans en mogelijkheid optimalisatie		uitvoering en comfort		
weegfactor	2	1	3	2	2	1	3	2	2	1	3	2	2	1	3	2	2	1	3	2	2	1	3	2	
Vloer hout H1	1	1	-1	-1	-2	1	1	-1	-1	-2	1	1	-1	-1	-2	1	0	0	0	2	1	0	0	0	2
Vloer hout H2	1	1	-1	0	0	1	1	-1	0	0	1	1	-1	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	2
vloer massief B1.1	-1	1	-1	0	-4	-1	1	-1	0	-4	-1	1	-1	0	-4	-1	0	0	0	-2	-1	0	0	0	-2
vloer massief B1.2	-1	1	-1	0	-4	-1	1	-1	0	-4	-1	1	-1	0	-4	-1	0	0	0	-2	-1	0	0	0	-2
vloer massief B2	0	1	0	1	3	0	1	0	1	3	0	1	0	1	3	0	0	1	1	5	0	0	1	1	5
Vloer staalplaat-beton SB1.1	-1	1	-1	-1	-6	0	1	-1	-1	-4	0	1	-1	-1	-4	0	0	0	-1	-2	0	0	0	-1	-2
Vloer staalplaat-beton SB1.2	-1	1	-1	-1	-6	-1	1	-1	-1	-6	-1	1	-1	-1	-6	-1	0	0	-1	-4	-1	0	0	-1	-4
Vloer staalplaat-beton SB2	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	3	0	0	1	0	3
Dak hout	1	1	-1	1	2	1	1	-1	1	2	1	1	-1	1	2	1	0	0	1	4	1	0	0	1	4
Dak staal	1	1	-1	-1	-2	1	1	-1	-1	-2	1	1	-1	-1	-2	1	0	0	-1	0	1	0	0	-1	0

Uit de beslissingsmatrix wordt duidelijk dat een verdeling van de vakwerkligger in 11 of 12 vakken de voorkeur heeft, waarbij een massieve betonnen vloer optie B2, dus de overspanning van het beton loodrecht op de traverse richting en een houten dak.

Er is gekozen om de vakwerkligger in $n = 12$ vakken gekozen vanwege de symmetrie van de traverse.

Met de gegevens, hoe de dak-, vloer en gevelelementen zijn opgebouwd, is het constructieve ontwerp van de traverse, zie Figuur 3-1 van de vastgestelde voorkeustraverse uitgetekend. In *bijlage 2* is het ontwerp op A3 formaat bijgevoegd.

De vakwerkliggers worden in 3 delen gefabriceerd vervoerd en op de bouwplaats gemonteerd.



Figuur 3-1: Constructief ontwerp traverse, bijlage 2

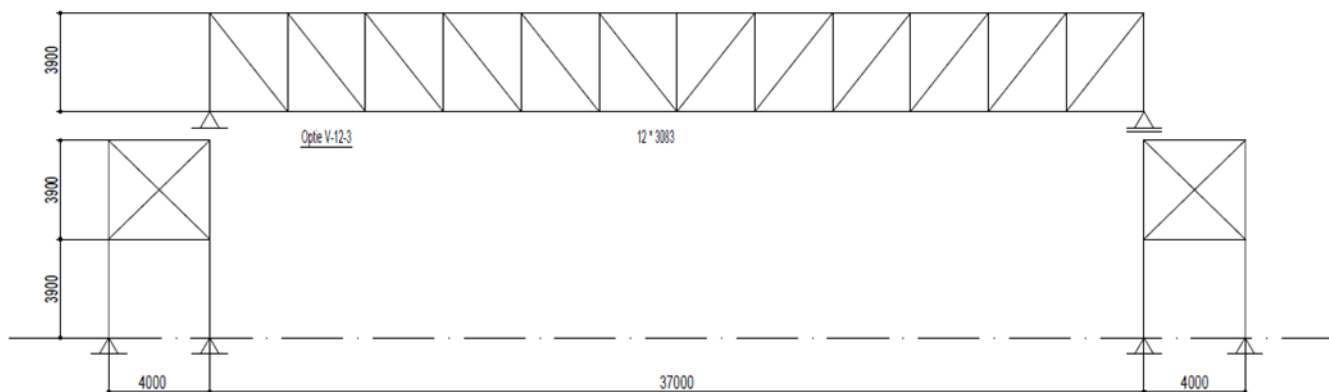
4. Uitwerking voorkeursvariant in spoorstaven en in constructiestaal

Zonder een correcte modellering kan geen correcte constructieve betrouwbaarheid, middels berekeningen, worden aangetoond.

Hiervoor zijn in deelrapport 4, voor de voorkeursvariant in spoorstaven (1), de modelleringen van de materiaaleigenschappen, de doorsnedegrootheden, de statische schema's en de belastingen op de constructieve elementen verantwoord. Daarna zijn handmatig de constructieve berekeningen uitgevoerd om de betrouwbaarheid aan te tonen

In deelrapport 5 zijn dezelfde stappen gevolgd, maar hier voor de voorkeursvariant uitgevoerd in constructiestaal (2). Voor de berekeningen van de betrouwbaarheid is gebruik gemaakt van het 3D raamwerk programma XFrame3D van de firma Struct4U. Deelrapporten 4 en 5 zijn na te lezen voor de volledige modellering en berekening van de voorkeursvariant voor respectievelijk spoorstaven(1) en constructiestaal (2).

In Figuur 4-1 is de modellering van de traverse weergegeven die voor (1) en (2) is gebruikt.



Figuur 4-1: Modellering traverse

4.1. Variant in spoorstaven

In deze paragraaf is de modellering van materiaaleigenschappen, doorsnedegrootheden, statische schema's en belastingen op de constructieve elementen verantwoord en zijn de berekeningen toegelicht voor variant (1).

4.1.1. Modellering materiaaleigenschappen

NEN-EN 13674 -1 geldt voor Vignole spoorwegrails 46 kg/m en daarboven. Hieruit blijkt dat voor spoorstaven een aparte staalsoort ontwikkeld is, met een andere chemische samenstelling. Bij spoorstaven is een hoge (Brinell)-hardheid belangrijk om slijtage van de spoorstaven te reduceren. Door de andere samenstelling zijn ook de mechanische eigenschappen anders dan die van

constructiestaal. Middels een speciale koude behandeling is er geen zichtbare vloeigrens meer. De fictieve vloeigrens gebaseerd op een 0,2% rek die bij het ontbreken van een vloeitraject gehanteerd wordt, staat niet vermeld in de norm, omdat deze niet belangrijk is voor het gebruik. Ondanks dat hier bij experts van DekraRail en ProRail navraag naar is gedaan, is de vloeigrens tot laat in het onderzoek onbekend gebleven. In (Esveld, 2005) is een tabel gevonden waarin de vloeigrens bij treksterkten van 700 en 800 MPa wordt genoemd. R260 Mn heeft een treksterkte van 880 MPa. Door middel van rechtlijnige interpolatie ontstaat een vloeispanning van 565 MPa, ofwel 565 N/mm².

In NEN-EN 1993-1-1, tabel 3.1 staan de staalsoorten, waarvoor de rekenregels uit deze norm gelden. R260Mn is geen constructiestaal en staat daarom niet in deze tabel.

Verder geeft de norm aan dat er ook gebruik gemaakt mag worden van productnormen, zoals bv NEN-EN 13674-1.

In productnormen wordt de vloeigrens aangeduid met R_{eH} (=f_y) en de treksterkte met R_m (=f_u).

NEN-EN 1993-1-1 geeft in paragraaf 3.2.2 ductiliteitseisen aan. Met behulp van deze eisen wil men plotselinge materiaalbreuk voorkomen, want de constructie moet kunnen vervormen, waarbij tijdens het vloeien spanningen worden herverdeeld voordat de constructie bezwijkt. Er moet gelden:

1. $f_u/f_y \geq 1,20$
2. verlenging bij breuk mag niet kleiner zijn dan 15 %
3. $\epsilon_u > 15 * \epsilon_y$, waarbij $\epsilon_y = f_y/E$

Deze eisen zijn in Tabel 4-1 verwerkt.

Tabel 4-1: Vergelijking staaleigenschappen

Vergelijk staaleigenschappen.				
eigenschap	eenheid	R260Mn	S235	S355
f _y	N/mm ²	565	235	355
f _u	N/mm ²	880	360	470
E	N/mm ²	210000	210000	210000
ε _y	%	0,27%	0,11%	0,17%
ε _u	%	10,0%	15,0%	15,0%
f _u /f _y		1,56	1,53	1,32
ε _u /ε _y		37,2	134,0	88,7

Staalsoort R260Mn voldoet volgens de productnormen niet aan de eisen voor de rekenregels uit de norm NEN-EN1993-1-1. Met name de breukrek van 10 % is een pijnpunt.

In de berekeningen is de vloeigrens gereduceerd met de volgende formule:

$$f_y = \epsilon_{u,req}/\epsilon_{u,appl} * 0,75 * f_{y,tabel\ 2-3} = 10/15 * 0,75 * 565 = 280 \text{ N/mm}^2$$

De factor 0,75 is toegepast vanwege het ontbreken van gegevens uit destructief onderzoek. Deze factor is ook om deze reden gehanteerd door IMD voor het project

Hoogstraat te Rotterdam waarbij gebruik gemaakt is van 2^e-hands staalprofielen, in een zogenaamd donor-skelet.

Als aanbeveling wordt meegegeven, om voorafgaand aan de toepassing van spoorstaven als constructie-element, de mechanische eigenschappen door middel van destructief materiaalonderzoek vast te stellen.

4.1.2. Doorsnede eigenschappen

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat voor slijtage van de railkop 15 mm rondom aangehouden moet worden. Voor corrosie moeten resterende maten voor lijfdikte van 12 mm, voetdikte van 7 mm en voetbreedte van 94 mm aangehouden worden. In Figuur 2-1 is de gedegreerde doorsnede, gearceerd weergegeven ten opzichte van de normdoorsnede.

De doorsnedegrootheden van de gedegreerde doorsnede zijn door middel van een modellering in autocad en een Exel-sheet vastgesteld. Ter verificatie is ook het normprofiel uit NEN-EN 13674-1 op de zelfde wijze bepaald. Hieruit ontstond een afwijking < 1%, zie Tabel 4-2.

Tabel 4-2: Doorsnede gegevens UIC 54E1 profiel zonder en met corrosie en slijtage

Doorsnede UIC 54E1 zonder corrosie en slijtage					Doorsnede UIC 54E1 met corrosie en slijtage				
A	6981		mm ²	100%	A	3958		mm ²	57%
h	159		mm	100%	h	142		mm	89%
b	140		mm	100%	b	94		mm	67%
I _y	2357	*10 ⁴	mm ⁴	100%	I _y	1106	*10 ⁴	mm ⁴	47%
z _{y,o}	75,9		mm		z _{y,o}	63,7		mm	
z _{y,b}	83,1		mm		z _{y,b}	78,3		mm	
W _{y,o}	310,5	*10 ³	mm ³	100%	W _{y,o}	173,6	*10 ³	mm ³	56%
W _{y,b}	283,6	*10 ³	mm ³	100%	W _{y,b}	141,3	*10 ³	mm ³	50%
I _z	419	*10 ⁴	mm ⁴	100%	I _z	107	*10 ⁴	mm ⁴	26%
z _z	70		mm		z _z	65		mm	
W _z	59,9	*10 ³	mm ³	100%	W _z	16,5	*10 ³	mm ³	28%
G	54,8		kg/m	100%	G	31,1		kg/m	57%

Met behulp van de vastgestelde vloeispanning en de doorsnedegrootheden zijn de volgende weerstanden voor het moment en de normaalkracht bepaald:

$$N_{Rd,bruto} = 3958 * 280 = 1108 * 10^3 \text{ N} = 1108 \text{ kN}, \text{ (zonder gatverzwakking door bouten)}$$

$$N_{Rd,netto} = 0,9 * 1108 = 997 \text{ kN}, \text{ (met 10 \% gatverzwakking door bouten)}$$

$$M_{Rd} = 141,3 * 10^3 * 208 = 39,6 * 10^6 \text{ Nmm} = 39,6 \text{ kNm}$$

Bij bovenstaande waarden is geen rekening gehouden met de reductiefactor χ voor instabiliteit zoals kip en knik. Deze effecten zijn in de betreffende situaties berekend.

4.1.3. Belastingen

De belastingen op de vakwerkligger zijn niet als knoopbelastingen uit de vloer- en de dakelementen op de knopen van de boven- en de onderrand, maar als gelijkmatig verdeelde belasting gemodelleerd. Dit is niet exact de werkelijkheid, maar rekent

snel en geeft een voldoende reëel beeld voor deze fase van het onderzoek voor de snedekrachten in de bovenrand, onderrand, de diagonale- en verticale wandstaven. De waarden uit de handberekening zijn weergegeven in Tabel 4-3.

Tabel 4-3: Snedekrachten variant (1)

Spoorstaven	
	M_{Ed} / N_{Ed}
	kNm / kN
Bovenrand	1848 kN
Onderrand	1848 kN
Verticaal	779 kN
Diagonaal	998 kN
dakligger	16,2 kNm
primaire vloerligger	26,8 kNm
secundaire ligger	29,7 kNm

4.1.4. Toetsing constructie

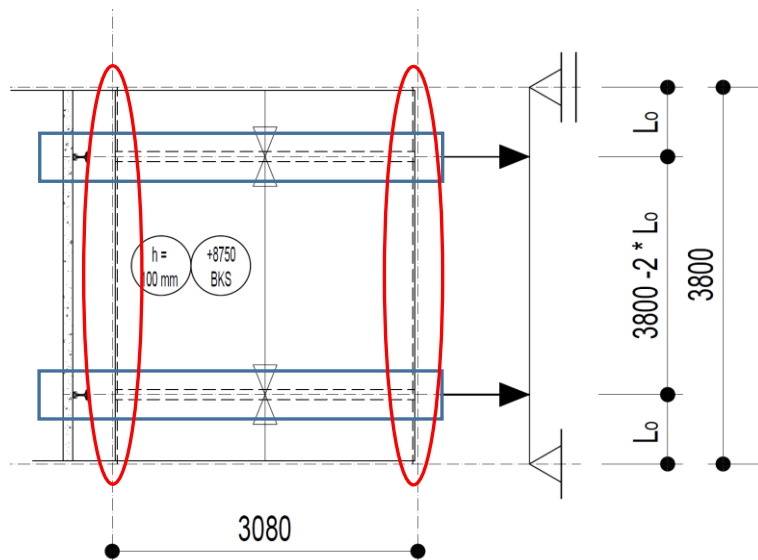
De toetsing aan de uiterste- en bruikbaarheids-grenstoestand (UGT en BGT) zijn uitgevoerd voor:

randstaaf vakwerkligger onder, randstaaf vakwerkligger boven, wandstaaf vakwerkligger verticaal, wandstaaf vakwerkligger diagonaal, dakligger, primaire vloerligger en de secundaire vloerligger.

De secundaire vloerligger is berekend als een staal-betonligger, de overige als stalen liggers.

Bij “normale” staalconstructies zijn er een heel scala aan standaard profielen in verschillende staalsoorten beschikbaar. In dit geval is 1 type spoorstaaf beschikbaar in de staalsoort R260Mn. Eerst is met behulp van de staafkrachten en de moment- en normaalkrachtweerstand, zoals bepaald in paragraaf 4.1.3, bepaald, hoeveel staven per constructieonderdeel nodig zijn, om aan het vloeicriterium te voldoen. Het uitgangspunt, dat de dakligger en de primaire vloerligger als enkele spoorstaaf moeten worden uitgevoerd, is gebaseerd op de gewenste verbinding met de vakwerkliggers. Voor de dakligger was dit geen probleem.

In Figuur 4-2 is het vloerelement weergegeven. Dit element bestaat uit een betonplaat met een dikte van 100 mm opgelegd op een secundaire ligger, in Figuur 4-2 rechthoekig omkaderd. Deze secundaire ligger werkt samen met het beton en is daarom uitgerekend als een staalbetonligger. De primaire vloerligger is ellipsvormig omkaderd in Figuur 4-2. De plaats van de oplegging van de secundaire liggers, maat L_0 in Figuur 4-2 is zodanig gekozen, dat ook een enkele spoorstaaf als primaire ligger voldoet aan het vloeicriterium in de UGT en doorbuiging in de BGT.



Figuur 4-2: Overzicht vloerelement

De secundaire vloerligger voldoet als stalen ligger ook al aan de UGT en de BGT. Toch is deze als staal-betonligger uitgerekend, omdat de vloerelementen als geheel gemaakt en vervoerd moeten worden en als herbruikbare delen later nog enkele malen ge(de)monteerd moeten worden.

Gebruikelijk is om de momentweerstand van staalbetonliggers plastisch te berekenen, hier is gekozen voor een elastische berekening. Vanwege de beperkte breukrek van R260Mn zal een vol-plastische momentweerstand nooit bereikt worden. In de berekening is, in de verhouding tussen de elasticiteitsmoduli van beton en staal, kruip van het beton meegenomen.

Voor de onderrand en de bovenrand van de vakwerkligger zijn minimaal 2 spoorstaven nodig om aan het vloeicriterium te voldoen. Voor de verticale en de diagonale wandstaven volstaat 1 spoorstaaf.

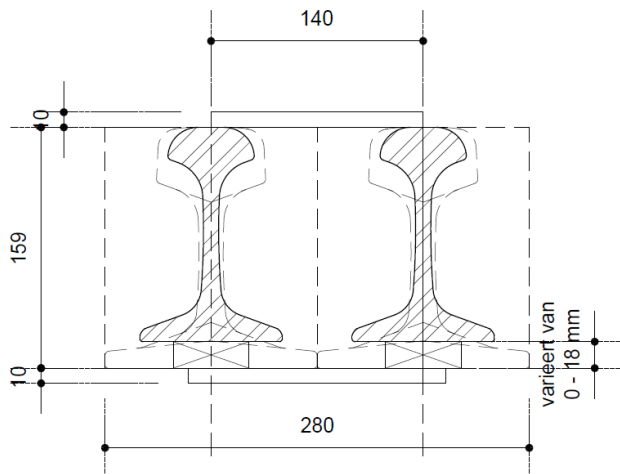
Met het uitgangspunt dat 2 spoorstaven voor de onder- en de bovenrand gebruikt worden is het fictieve traagheidsmoment van de vakwerkdoorsnede bepaald en de doorbuiging getoetst aan de BGT. De einddoorbuiging is berekend op 69 mm. De verhouding tussen de onmiddellijke en de bijkomende doorbuiging is circa 1: 1. Door de vakwerkliggers een zeeg van 100 mm te geven is doorbuiging geen probleem.

De randstaven in de bovenrand van de vakwerkligger worden op druk belast en zijn daardoor gevoelig voor knik in en uit het vlak van de vakwerkligger.

Om hiervoor een toetsing uit te voeren, moet bekend zijn hoe 2 spoorstaven gekoppeld worden tot 1 rekenkundige staaf. Hierbij is het noodzakelijk rekening te houden met de praktische uitvoerbaarheid. Bij de berekeningen is uitgegaan van de minimale doorsnede van spoorstaven door slijtage en corrosie. Uit deze doorsnededegradatie is slechts een nieuwe fictieve doorsnede ontstaan. De werkelijke doorsnede zal tussen de normdoorsnede en de doorsnede van de maximaal gedegradeerde spoorstaaf inliggen. De doorsnede van een enkele staaf is dus NIET maatvast.

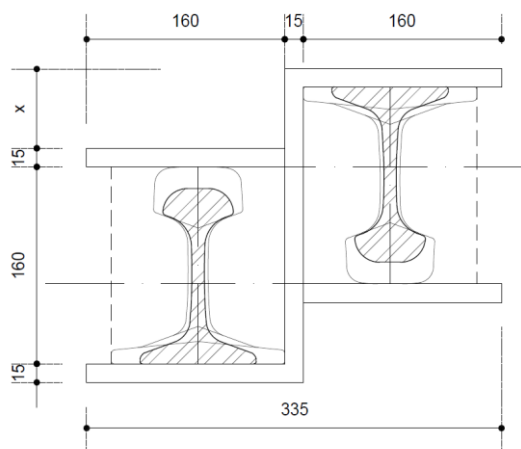
Uit diverse mogelijkheden is op basis van maatvastheid en uitvoerbaarheid gekozen voor de doorsnede uit Figuur 4-3. De staven liggen de breedte van een normstaaf uit elkaar, de bovenzijde van de staven wordt met een plaat gekoppeld de onderzijde

wordt uitgevuld met platen van een variabele dikte en ook verbonden met een koppelplaat.



Figuur 4-3: Samengestelde doorsnede van 2 gekoppelde spoorstaven

Uit het vlak kan de kniklengte van deze staven verkort worden door het koppelen van de bovenrand aan de dak-elementen. De dak-elementen werken door het stabiliteitsverband in het dak als schijf en bieden daarom voldoende steun. Voor knik in het vlak van de vakwerkligger zijn knikverkorters minder makkelijk te realiseren. Een knikberekening is daarom eerst voor deze richting uitgevoerd zonder rekening te houden met de schuifstijfheid van de koppelplaten. Het resultaat van deze berekening levert een $UC = 1,13$. Om de UC te verlagen moet de reductiefactor χ_y verlaagd worden. Zonder extra materiaal toe te voegen zal hiervoor het traagheidsmoment om de Y-as vergroot moeten worden ofwel de staven moeten verticaal uit elkaar geschoven worden. Bij de gekozen gekoppelde doorsnede is dit onmogelijk. Uit oogpunt van uitvoering en de maatvastheid is de doorsnede uit Figuur 4-4 ontstaan, waarbij de in hoogte van het Z-profiel een variabele maat x is gegeven.



Figuur 4-4: Samengestelde doorsnede met variabele hoogte

Voor deze doorsnede-berekening is een Excel-sheet opgesteld, waarbij de variabele maat 'x' kan worden ingevoerd en daarmee de toetsing uitgevoerd wordt op basis van de gecorrigeerde kniklengte door de schuiftijheid van de koppelplaten.

Voor de variabele maat x van 80 mm is een UC van 0,99 berekend.

Bij deze doorsnede komt de unity-check voor knik om de Z-as uit op UC = 1,19. De bovenrand moet dus gekoppeld worden aan de dakelementen.

Ook de verticale wandstaven worden op druk belast. Een enkele spoorstaaf is veel te slank. Hiervoor is een dubbele spoorstaaf noodzakelijk. Uitgevoerd volgens Figuur 4-3 geeft dit een UC = 0,46 voor knik om de z-as en een UC = 0,56 voor knik om de y-as. Tabel 4-4 geeft een totaal overzicht van de unitychecks en doorbuiging van de traverse in spoorstaven.

Tabel 4-4: Waarden UC en doorbuiging onderdelen traverse in spoorstaven

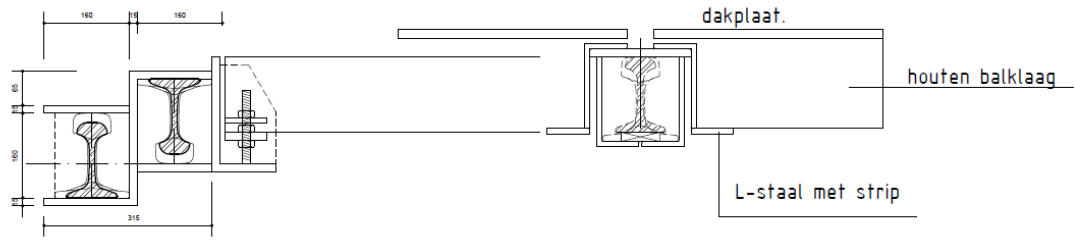
Onderdelen traverse		
	UC	doorbuiging
dakligger	0,41	7,5 mm
primaire vloerligger	0,68	13,5 mm
secundaire vloerligger	0,32	2,3 mm
vakwerkligger		69 mm
bovenrand	z-as	1,19*
	y-as	0,99
verticaal	z-as	0,46
	y-as	0,56
onderrand	0,83	
diagonaal	0,93	
* bovenrand moet gekoppeld worden aan de dakelementen		

4.1.5. Verbindingen vloer- en dak-elementen aan de vakwerkliggers

Uit het literatuur onderzoek bleek dat de verbindingen, om de industriële modules te kunnen assembleren en te demonteren voor meervoudig gebruik, ontworpen moeten worden zodat ze: snel en eenvoudig te monteren en demonteren zijn, bereikbaar zijn en blijven en niet beschadigd worden bij monteren en demonteren.

Op basis van deze uitgangspunten zijn principedetails ontworpen voor de volgende aansluitingen (bijlage 6):

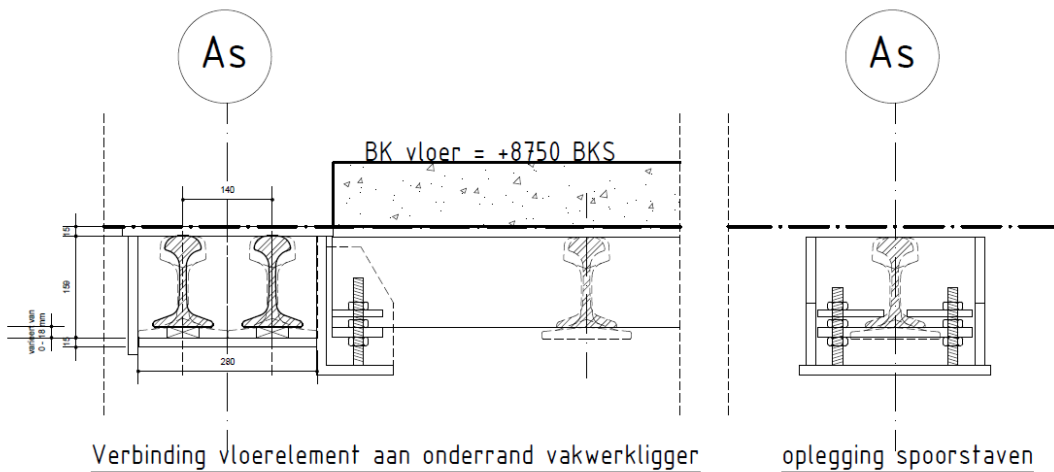
- de dakligger aan de bovenrand van de vakwerkligger, zie Figuur 4-5
- de dakelementen aan de dakligger, zie Figuur 4-5
- de vloerelementen aan de onderrand van de vakwerkligger zie Figuur 4-6 en
- de oplegging van de secundaire vloerliggers op de primaire vloerliggers zie Figuur 4-7.



Verbinding dakligger aan bovenrand vakwerkligger

oplegging dakelement op dakligger

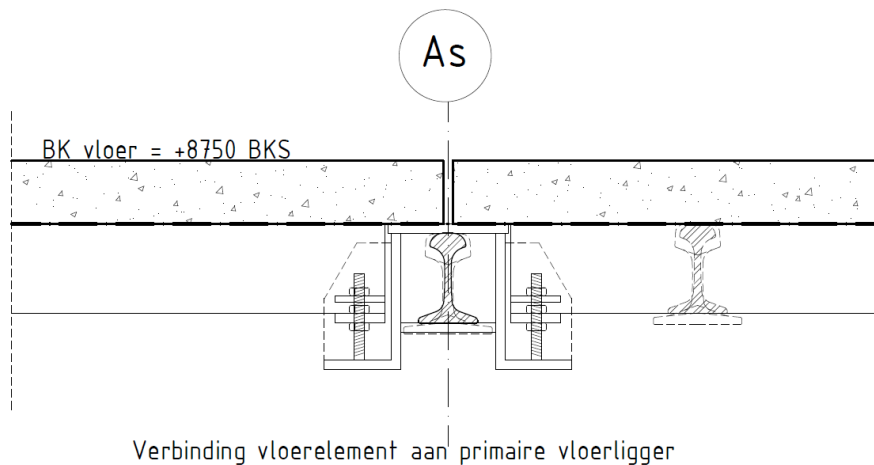
Figuur 4-5: Verbindingen op dakniveau



Verbinding vloerelement aan onderrand vakwerkligger

oplegging spoorstaven

Figuur 4-6: Verbinding vloer element aan de onderrand van de vakwerkligger en de oplegging



Verbinding vloerelement aan primaire vloerligger

Figuur 4-7: Oplegging vloerelement op primaire ligger

4.2. Constructie traverse uitgevoerd in constructiestaal

In deze paragraaf is de modellering van materiaaleigenschappen, doorsnedegrootheden, statische schema's en belastingen op de constructieve elementen verantwoord en zijn de berekeningen toegelicht voor variant (2), de traverse in constructiestaal.

4.2.1. Modellering en berekening van de constructie

Voor de berekeningen, van de variant (2), is gebruik gemaakt van het 3-D raamwerkprogramma leverancier Struct4U, onderdeel XFrame3D.

De modellering van de constructie in het raamwerkprogramma kan gezien worden als een draadmodel bestaande uit staven.

Aan de staven zijn de volgende profielen en materialen toegekend:

- Vakwerk randstaven boven rechthoekige koker RHS 300x200x8,0 in de staalsoort S355 J2H, warmgewalst.
- Vakwerk randstaven onder rechthoekige koker RHS 300x200x6,3 in de staalsoort S355 J2H, warmgewalst.
- Vakwerk wandstaven verticaal en diagonaal rechthoekige koker VKS 300x200x8,0 in de staalsoort S355 J2H, warmgewalst.
- Dakligger IPE160 S235JR
- Primaire vloerligger HE220A, in de staalsoort S355 J2H, warmgewalst.
- Secundaire vloerligger HE180A, in de staalsoort S355 J2H, warmgewalst.

Er is een verschil in de modellering van de statische schema's tussen de variant (2) ten opzichte van de variant (1), voor het onderdeel vakwerkliggers. Bij de variant (2) worden de staven van de vakwerkligger in de knopen niet scharnierend maar momentvast gemodelleerd.

De oplegging van de dakligger op de bovenrand van de vakwerkligger, de oplegging van de secundaire op de primaire vloerliggers en de oplegging van de primaire liggers op de onderrand van de vakwerkligger zijn scharnierend gemodelleerd gelijk aan de variant (1). De stabiliteitsverbanden in het dak en de vloer zijn als trek-elementen gemodelleerd.

De wijze waarop de krachten door de constructie gaan wordt bepaald door randvoorwaarden, die aan knopen worden toegekend.

De traversevloer wordt in de hoekpunten door de portalen ondersteund.

Hier zijn randvoorwaarden voor verhinderingen van verplaatsingen in de x-, y- en de z-richtingen aangegeven.

Ter plaatse van het dak zorgen de portalen dat er geen verplaatsing van het dak kan plaatsvinden. Hier is aan 2 hoekpunten de randvoorwaarde meegegeven dat zij niet in de x-richting kunnen verplaatsen.

In tegenstelling tot de handberekeningen bij variant (1) worden hier de belastingen uitsluitend aangebracht op de staven die daadwerkelijk belast worden. Het eigen gewicht wordt door het programma zelf gegenereerd.

Nadat de geometrie, randvoorwaarden en de belastingen zijn ingevoerd, heeft het programma middels een iteratieve methode de krachtswerking, geometrisch niet lineair berekend. Hierbij zijn de vervormingen, die bij de eerste (orde) berekening zijn ontstaan, gebruikt om 2^e-orde krachten en vervormingen iteratief te berekenen. Het voordeel van deze methode is, dat hierdoor geen 2^e orde-effecten in de toetsing van de staven meer hoeft te worden meegenomen.

De toetsing van alle staven wordt door het programma verricht. De UC-waarden per staaf kunnen in een afbeelding getoond worden. Bij overschrijding van de UGT zijn de staven geoptimaliseerd tot er met minimale doorsneden overal een UC < 1,0 bereikt is. De bovengenoemde staafdoorsneden zijn de uiteindelijke profielen geworden.

De maximale waarden van staafkrachten, de toetsingen van de staven aan de UGT en de BGT die bepaald zijn, zijn in bijlage 2 van deelrapport 5, handmatig geaccentueerd om deze te kunnen vergelijken met die van de handberekeningen.

Tabel 4-5: Staalconstructie van de traverse met constructiestaal

	constructiestaal								
	aantal	lengte	profiel	staafnummer	gewicht/m	gewicht	M _{Ed} / N _{Ed}	UC	w _{eind}
		m			kg/m	kg	kNm / kN		mm
Bovenrand	24	3,08	RHS 300x200x8	6, 7, 18, 19	60,3	4462	1770 kN	0,76	
Onderrand	24	3,08	RHS 300x200x6,3	55, 56, 67, 68,	47,9	3544	1441	0,67	
Verticaal	26	3,90	VKS150x150x8,0	124, 126, 138, 149	35,1	3559	698 kN	0,80	
Diagonaal	24	4,98	VKS150x150x8,0	150, 165, 172, 180	35,1	4195	855 kN	0,81	
dakligger	13	3,80	IPE160	25 t/m 37	15,8	781	16,9 kN	0,58	9,7
primaire vloerligger	13	3,80	HE220A	74 t/m 87	51,5	2544	63,9 kNm	0,89	3,7*
Secundaire ligger	24	3,08	HE180A	100 t/m 123	36,2	2679	31,9 kNm	0,48	6,0
					totaal	21763			
Oplegreacties					751 kN				
Doorbuiging					61 mm				
* geoptimaliseerd naar L _o is 0,207 L, zie deelverslag 3 Ontwerp traverse.									

In Tabel 4-5 zijn de maximale snedekrachten en de UC van de maatgevende staven weergegeven.

Deze waarden voor de snedekrachten en de vervorming van de vakwerkligger zijn vergeleken met de waarden van de handberekeningen variant (1).

4.3. Vergelijking varianten

In deze paragraaf worden de waarden van de snedekrachten en doorbuigingen tussen de varianten (1) en (2) met elkaar vergeleken, Tabel 4-6.

Voor de oplegreacties is het verschil:

$$779 - 751 = 28 \text{ kN} = 3,7 \%$$

Dit kan verklaard worden door afrondingen naar boven in de handberekeningen en het ingevoerde gewicht van de vakwerken groter is bij (1) groter dan bij (2).

Voor de drukkracht in de bovenrand is het verschil:

$$1848 - 1770 = 78 \text{ kN} = 4,2 \%$$

Voor de trekkracht in de onderrand is het verschil:

$$1848 - 1441 = 407 \text{ kN} = 22,0 \%$$

Dit verschil is erg groot, maar kan verklaard worden omdat voor de berekening bij (1) een benaderingsmethode is gebruikt. Ook de extra belasting speelt een rol, zie verschil in oplegreacties.

Tabel 4-6: Vergelijking snedekrachten, doorbuiging en gewicht tussen (1) en (2)

Onderdeel	spoorstaven				constructiestaal			
	profiel	gewicht	M_{Ed} / N_{Ed}	w_{eind}	profiel	gewicht	M_{Ed} / N_{Ed}	w_{eind}
		kg	kNm / kN	mm		kg	kNm / kN	mm
Bovenrand	2 x UIC54E1	6659	1848		RHS 300x200x8	4462	1770	
Onderrand	2 x UIC54E1	6659	1848		RHS 300x200x6,3	3544	1441	
Verticaal	2 x UIC54E1	9126	779		VKS150x150x8,0	3559	698	
Diagonaal	1 x UIC54E1	5378	998		VKS150x150x8,0	4195	855	
dakligger	1 x UIC54E1	2223	16,2	7,5	IPE160	781	16,9	9,7
primaire vloerligger	1 x UIC54E1	2223	26,8	13,5	HE220A	2544	63,9	3,7
Secundaire ligger	1 x UIC54E1	3330	29,7	2,3	HE180A	2679	31,9	6,0
		35599				21763		
	Oplegreacties 779 kN Doorbuiging 69 mm				Oplegreacties 751 kN Doorbuiging 61 mm * geoptimaliseerd naar L_0 is 0,207 L, zie deelverslag 3 Ontwerp traverse.			

De doorbuiging van de vakwerkliggers komen vrij goed bij elkaar, verschil 11 %. Dit komt door de inschatting van de reductie op het traagheidsmoment voor de verbindingen.

Belangrijk voor de CO₂-emissie, zie hoofdstuk 5, is het staalgewicht.

Spoorstaven 35600 kg (100%) ten opzichte van constructiestaal 21800kg (61,2%).

5. Berekening CO₂ emissie

In het deelrapport 2 “Literatuuronderzoek” is in hoofdstuk 2 de noodzaak voor het reduceren van CO₂-uitstoot te lezen.

Dit hoofdstuk moet met de gegevens uit de vorige hoofdstukken een antwoord geven op de hoofdvraag:

Hoe groot is de CO₂-winst bij toepassing van gebruikte spoorstaven ten opzichte van gebruik van nieuwe staalprofielen bij de bouw van een modulaire spoortraverse?

Aan dit hoofdstuk ligt deelrapport 6 “Uitwerking CO₂-emissie varianten spoorstaven en constructiestaal” ten grondslag, waarin de complete onderbouwingen na te lezen zijn.

EN15804 (Technical Committee CEN / TC 350, 2017) biedt een methode om een emissie te berekenen voor bouwwerken. In dit hoofdstuk wordt hiermee uitsluitend de CO₂-emissie bedoeld. Vanwege de circulaire economie wordt in deze norm niet meer alleen naar de lasten, CO₂-load, maar ook naar de lusten, CO₂-benefit, voor de emissies gekeken.

Hiervoor wordt uitgegaan van de levenscyclus van het bouwwerk, deze bestaat uit de volgende fasen:

A: Productiefase, B: gebruiksfase, C: fase einde levensduur. Dit is de situatie voor de lineaire economie. Hierin ontstaan de CO₂-loads.

D: is de fase waarin de CO₂-benefits ontstaan door hergebruik, recycling en verbranding, in Afval VerbrandingsInstallaties, (AVI's) waarmee energie wordt opgewekt.

Voor iedere fase zijn er onderverdelingen gemaakt voor grondstofgebruik, transport, arbeid et cetera.

Aan bouwproducten kan via een assessments een Environmental Product Declaration (EPD) worden afgegeven voor de hele cyclus, dus A t/m D. Hierin is zichtbaar per fase wat de loads en de benefits zijn per (emissie) hoofdgroep. Al deze EPD's worden opgeslagen in de Nationale MilieuDatabase (NMD).

De EPD's uit de NMD kunnen gebruikt worden om voor de hele levenscyclus van een bouwwerk de loads te bepalen, maar hiervoor is dan wel de Building Life Cycle Information nodig. Of wel de levensloop van het bouwwerk.

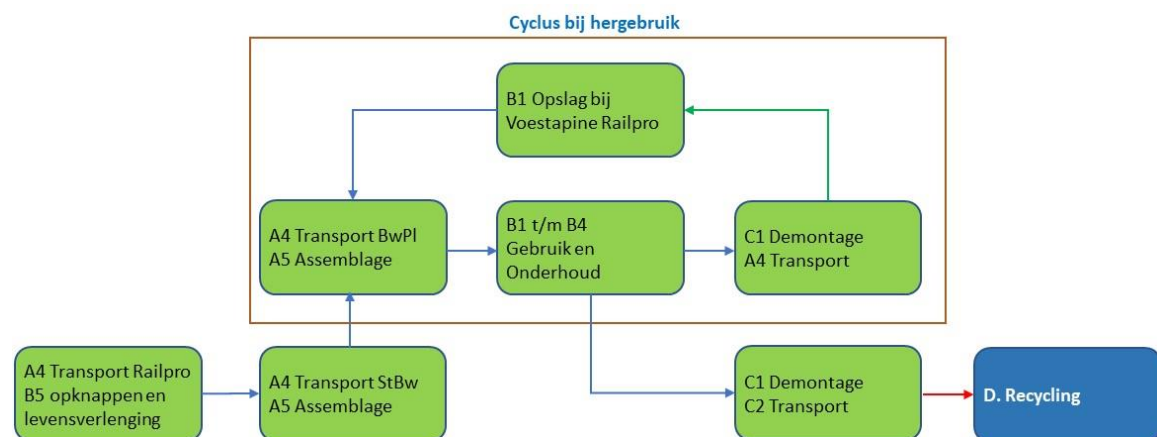
In Deelrapport 6 is de volgende werkwijze toegepast:

1. Opzoeken wat de CO₂-emissies zijn voor productie, transport en montage en demontatage. Hiervoor zijn gebruikt:
 - De CO₂ ketenanalyse van ProRail (ProRail, 2010)
 - De EPD Heavy Construction Products (Bouwen met Staal, 2014)
 - De CO₂ barometer <https://www.milieubarometer.nl/CO2-footprints/co2-footprint/actuele-co2-parameters-2018-en-verder/>

- De uitgangspunten voor vervoer, montage en demontage vastgelegd.
Hiervoor is bijvoorbeeld een gemiddelde afstand aangehouden van Railpro, waar de traverse wordt opgeslagen naar een om te bouwen station van 100 km.
- Daarna is per variant (1) en (2) de Building Lifecycle Information in een schema weergegeven. Hierbij is opgesplitst in een deel voor eenmalig gebruik en voor de hergebruikscyclus.
- Daarna is door koppeling van de sheets, die gemaakt zijn voor stappen 1. en 2. Een berekeningsheet gemaakt voor de berekening van de loads.

5.1. CO₂ emissie berekening variant (1)

Bij een groot vervangingsproject van een spoortraject hebben de spoorstaven de “einde levensduur fase” bereikt. Vanaf hier start het levensproces. Het schema voor de Building Lifecycle Information is weergegeven in Figuur 5-1.



Figuur 5-1: Schema Building Lifecycle Information Variant (1)

Voor een toelichting op de stappen, die in het schema staan, wordt verwezen naar Deelrapport 6.

In stap 1 staat geen productie omdat de staven al beschikbaar zijn. Voor dit onderdeel is een waarde 0 aangehouden.

Bij stap D. Recycling is een verlies van 10% aangehouden tijdens de sloop van de traverse.

De berekende CO₂-load bedraagt circa 20800 kg CO₂.

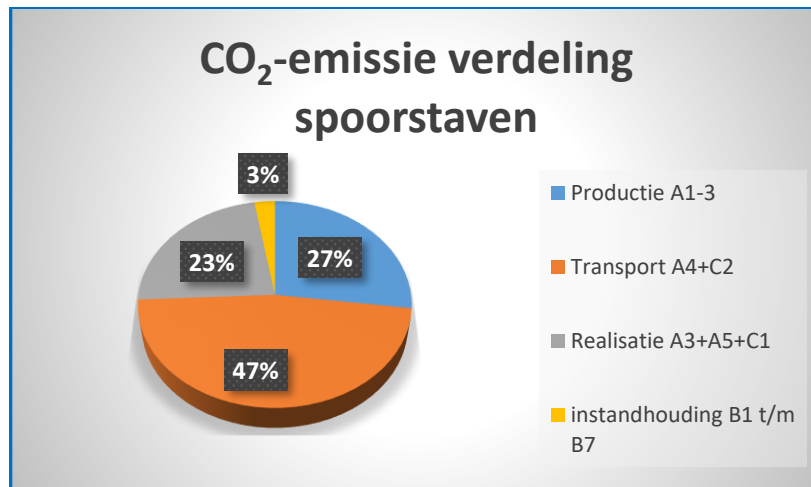
De berekende CO₂-benefit bedraagt circa 17400 kg CO₂.

Hiermee wordt de netto CO₂-emissie 3400 kg CO₂.

In de cyclus voor hergebruik ontstaan alleen loads en geen benefits.

De berekende CO₂-load bedraagt circa 7200 kg CO₂.

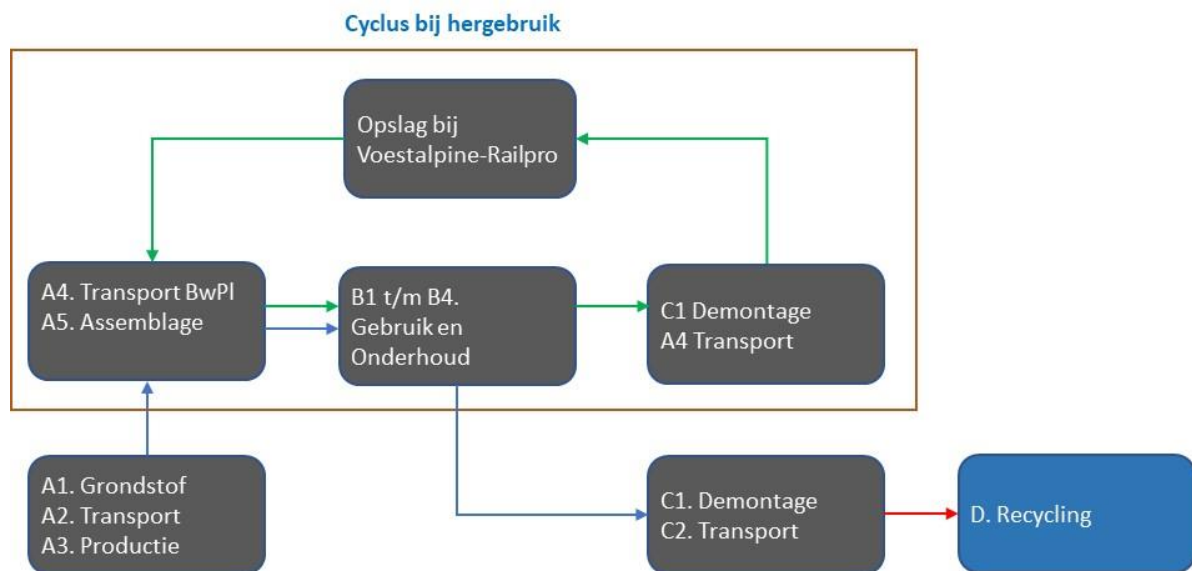
In Figuur 5-2 is de verdeling van de CO₂-loads over de onderdelen productie, transport, realisatie en instandhouding weergegeven, dus zonder hergebruik.



Figuur 5-2: Verdeling CO₂-loads bij eenmalig gebruik variant (1)

5.2. CO₂ emissie berekening variant (2)

In deze situatie ontstaat de traverse bij de delving van grondstoffen. Het levensproces begint voor de traverse dus op dit punt. Het schema voor de Building Lifecycle Information is weergegeven in Figuur 5-3.



Figuur 5-3: Schema Building Lifecycle Information Variant (2)

Voor een toelichting op de stappen, die in het schema staan, wordt verwezen naar Deelrapport 6.

Bij stap D. Recycling is een verlies van 10% aangehouden tijdens de sloop van de traverse.

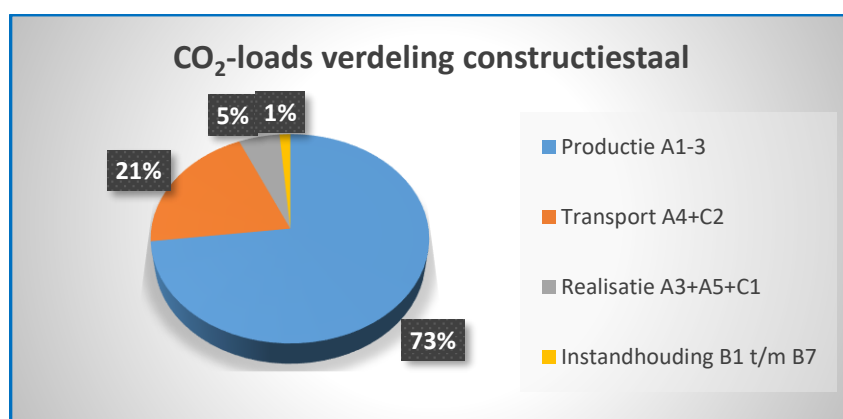
De berekende CO₂-load bedraagt circa 36400 kg CO₂.

De berekende CO₂-benefit bedraagt circa 13900 kg CO₂.

Hiermee wordt de CO₂-emissie 22500 kg CO₂.

In de cyclus voor hergebruik ontstaan alleen loads en geen benefits.
De berekende CO₂-load bedraagt circa 7000 kg CO₂.

In Figuur 5-4 is de verdeling van de CO₂-loads over de onderdelen productie, transport, realisatie en instandhouding weergegeven, dus zonder hergebruik.



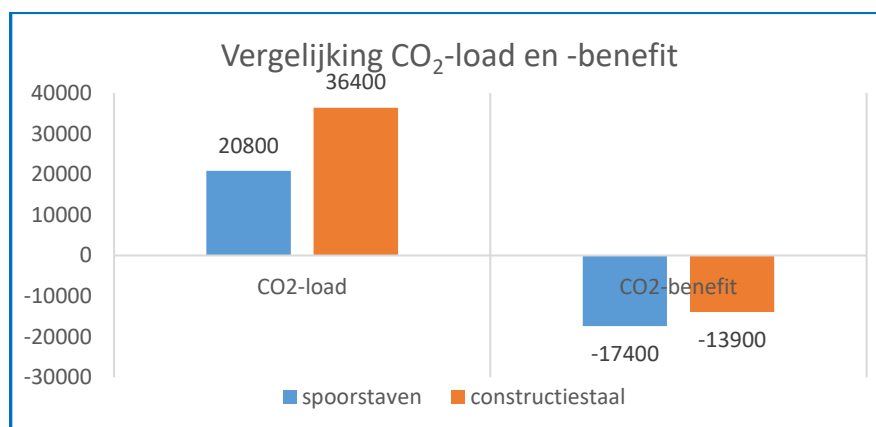
Figuur 5-4: Verdeling CO₂-loads bij eenmalig gebruik variant (2)

5.3. Vergelijking CO₂-emissie's variant (1) en (2)

Of er winst te behalen is als spoorstaven gebruikt worden als constructief-staal is een belangrijk aspect in het onderzoek.

In Figuur 5-5 zijn de berekeningen gevisualiseerd in een staafgrafiek met daarin de CO₂-load en de CO₂-benefit.

Hieruit blijkt een duidelijk voordeel van 3400 kg CO₂ voor variant (1), traverse uitgevoerd in spoorstaven, ten opzichte van variant (2), traverse uitgevoerd in constructiestaal, 22500 kg CO₂. Variant (1) veroorzaakt slechts 15% van de CO₂-emissie ten opzichte van constructiestaal.



Figuur 5-5: Vergelijking CO₂-load en -benefit

In hoofdstuk 3 en 4 van deelrapport 6 is duidelijk geworden dat grondstof- gebruik een groot aandeel heeft in de CO₂-emissies. De loads voor de productiefase (A) zijn voor de variant (1) op nul gesteld.

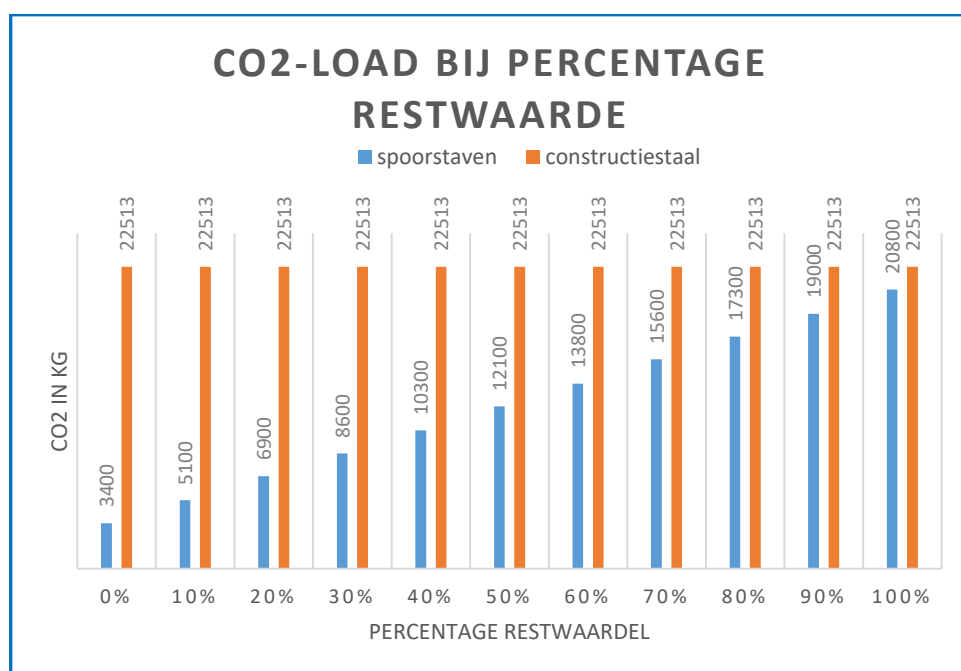
Dit laat een heel gunstig beeld zien voor de variant (1). Zowel op de CO₂-load als op de CO₂-benefit scoort deze variant goed.

De conclusie die hier uit getrokken kan worden, is: extra veel spoorstaven in de traverse gebruiken, dan wordt het voordeel ten opzicht van constructiestaal nog groter. NIET LOGISCH. Typisch geval van : “wel de lusten maar geen lasten”.

Het op nul stellen van de productie is onlogisch gebleken, immers als de staven waren afgevoerd voor recycling, was er een benefit geweest, welke eigenlijk nu als een load voor productie ingevoerd had moeten worden.

Welke restwaarde aan de spoorstaven gegeven moeten worden, hangt van heel veel factoren af. Zie hiervoor deelverslag 6.

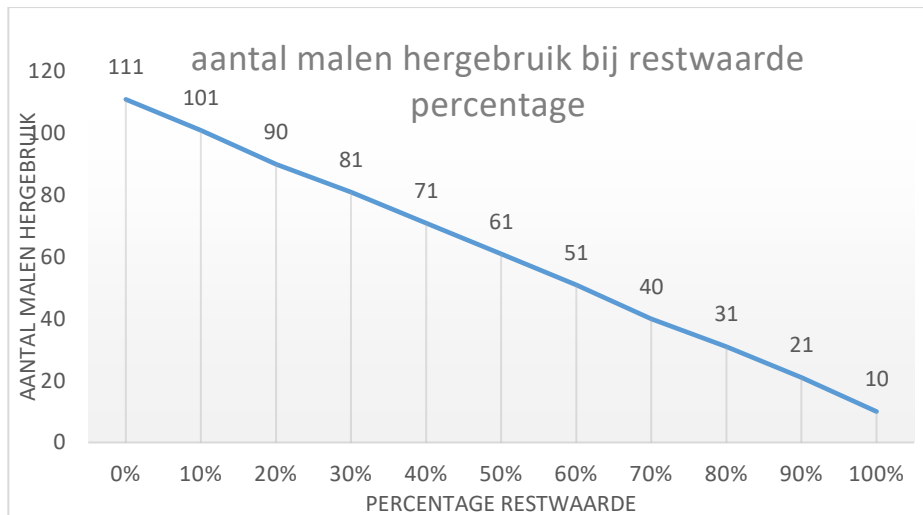
Om toch richting te kunnen geven aan een antwoord op de hoofdvraag is een variabele aanname voor de restwaarde gedaan op de CO₂-benefit na de eerste cyclus. In stappen van 10% op een schaal van 0% tot 100% is voor variant (1) deze benefit als load voor de productie gehanteerd. Voor iedere stap is de CO₂-emissie vergeleken tussen varianten (1) en (2). Dit is gevisualiseerd in Figuur 5-6.



Figuur 5-6: Verloop CO₂-emissie bij stijgend percentage restwaarde

Het verschil in CO₂-emissie blijkt bij 100% restwaarde nog maar 1700 kg CO₂ te bedragen, dit is 92 %.

Een ander interessant aspect is het aantal malen hergebruik ‘n’, waarbij de CO₂-load ten gunste van constructiestaal omslaat. Dit is uitgezet in een grafiek, zie Figuur 5-7.



Figuur 5-7: Grafiek omslagpunt aantal hergebruik.

Wat nu wel duidelijk wordt is, dat er minimaal 10 maal hergebruik moet plaatsvinden, voordat de variant in constructiestaal, op het gebied van CO₂-emissie, gunstiger wordt, ook al is de restwaarde van de spoorstaven op 100% gesteld.

6. Conclusies

Reductie van de CO₂-uitstoot is een van de doelen van het klimaatverdrag van Parijs. Een transitie van een lineaire naar een circulaire economie kan hierin een behoorlijke bijdrage leveren. In 2020 is het de bedoeling om spoorboekloos met de trein te kunnen reizen. Veel stations moeten hiervoor aangepast worden, waarbij tijdelijke traversen ervoor zorgen dat passagiers de treinen kunnen bereiken. In opdracht van ProRail worden spoorstaven op het einde van de levensduur vervangen en gerecycled.

Het doel van dit onderzoek is antwoord te geven op de onderzoeksvraag:

Hoe groot is de CO₂ winst bij toepassing van gebruikte spoorstaven ten opzichte van gebruik van nieuwe staalprofielen bij de bouw van een modulaire spoortraverse?

Op basis van berekeningen is aangetoond dat een modulaire demontabele traverse te bouwen is. Hiervoor is de constructie van de ontworpen traverse opgebouwd uit modulaire houten dak-elementen, modulaire vloerelementen van beton met aangestorte stalen liggers. De dak-elementen en de vloerelementen worden met stalen liggers opgelegd op stalen vlakke vakwerkliggers, die in 3 delen getransporteerd kunnen worden.

Aangetoond is dat, onder bepaalde voorwaarden, voor nagenoeg alle constructieve onderdelen, spoorstaven gebruikt kunnen worden.

Bij dezelfde modulaire traverse, opgebouwd uit dezelfde elementen maar nu uitgevoerd in constructiestaal, is aangetoond dat hiervoor bijna 40% minder staal nodig is. De oorzaak is dat veel materiaal inefficiënt gebruikt wordt bij de traverse met spoorstaven, omdat er slechts 1 spoorstaafprofiel beschikbaar is. Bij een (kleine) overschijding van de spanning in de doorsnede van de spoorstaaf, zal een doorsnede samengesteld moeten worden uit minimaal 2 spoorstaven, waardoor een dubbel staalgebruik nodig is.

Doordat spoorstaven onderhevig zijn aan slijtage en corrosie, hebben alle spoorstaven andere doorsnedematen. Demontabel bouwen vereist een industriële aanpak met beperkte maattoleranties. Aangetoond is dat dit met spoorstaven, die in bepaalde gevallen gekoppeld moeten worden tot een samengestelde doorsnede, uitsluitend te realiseren is met heel veel koppelplaten. Van de staalsoort R260MN is bekend, dat speciale lastechnieken nodig zijn om de koppelplaten vast te lassen zodat de constructieve samenwerking gewaarborgd is.

Principedetails tonen aan dat de spoorstaven, die niet maatvast zijn, ingewikkelde en arbeidsintensieve verbindingen veroorzaken, voor de aansluitingen van de dak – en de vloer-elementen aan boven- en de onderrand van de vakwerkliggers.

Emissieberekeningen, volgens EN15804, laten niet duidelijk zien hoe groot de CO₂-winst is. Dit is het gevolg van het gebrek aan gegevens over de restwaarde van de spoorstaven op het einde van het eerste leven. Middels een berekening met een variabele restwaarde, is in het ongunstigste geval toch nog een kleine CO₂-winst te behalen. Hierbij moet worden opgemerkt dat bepaalde kengetallen voor CO₂-lasten per eenheid, grote afwijkingen kunnen hebben, dit veroorzaakt grote afwijkingen in de CO₂-emissie berekeningen.

7. Aanbevelingen

In het onderzoek zijn een aantal aannamen gedaan, die middels het literatuuronderzoek en interviews met experts, niet geverifieerd konden worden. Dit betreft bijvoorbeeld de aanname dat er geen degradatie van materiaaleigenschappen heeft plaats gevonden door het slijpen van spoorstaven en dynamische belastingen veroorzaakt door de treinen. Ook over de vloeigrens van R260Mn is weinig bekend, omdat deze eigenschap onbelangrijk is voor de toepassing van spoorstaven. Destructief onderzoek naar de materiaaleigenschappen van de gebruikte spoorstaven moeten hierover meer duidelijkheid verschaffen.

Bij de optimalisatie van de primaire vloerligger is het overstek van de betonvloer verkleind en daarmee de afstand tussen de secundaire liggers vergroot. De slankheid van de vloer is hierdoor heeft hierdoor de gebruikte slankheidseis bereikt. Door een nauwkeurige doorbuigingsberekening uit te voeren zal dit gecontroleerd moeten worden.

Nader onderzoek, naar effectiever vervoer over de weg, waarbij een doorlopende of incidentele ontheffing benodigd is, kan aantonen dat hiermee het aantal transporten voor vervoer van de traverse gereduceerd kan worden. Dit zal een CO₂-winst opleveren.

Aangezien de invloed van de restwaarde van de spoorstaven veel invloed heeft op de CO₂-last bij de variant met spoorstaven is nader onderzoek hiernaar benodigd.

In het onderzoek is geen rekening gehouden met financiële verschillen tussen de variant met spoorstaven en de variant in constructiestaal. De financiële haalbaarheid in relatie tot de CO₂-winst zal nader onderzocht moeten worden.

Begrippen & Symbolenlijst

Begrip/symbool	Toelichting
AVI	Afval VerbrandingsInstallatie
BW	Bodemwaarde: kwaliteitswaarde die ProRail als minimum norm bij spoorstaven hanteert
CFC's	Chloorfluorkoolwaterstoffen
CO ₂ -benefit	Lusten, winst tgv van hergebruik en recycling
CO ₂ eq	de uitstoot van broeikasgassen uitgedrukt in CO ₂ -equivalenten
CO ₂ -emissies	= CO ₂ -load minus CO ₂ -benefit
CO ₂ -load	CO ₂ -Lasten tgv productie, gebruik en sloop
CO ₂ prestatieladder	
<i>DuboCalc</i>	Programma ontwikkeld door Rijkswaterstaat (RWS), gebruikt naast de gegevens over grondstoffen en (half)producten ook informatie over de gevolgde processen Hiermee kan een MKI-waarde bepaald worden
$e_{\text{module D1}}$	Emissies en gebruikte energie per eenheid uitgedrukt in kg CO ₂ -eq
$E_{\text{MR after EoW out}}$	Emissies en gebruikte energie per eenheid voor het recycling proces
EPD	Environmental Product Declaration
GWP	Global Warming Potential
http	Human Toxicity Potential
IFD-bouwen	Industrieel Flexibel en Demontabel bouwen
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCA	Life-Cycle-Assessment
NMD	Nationale MilieuDatabase waarin vastgestelde emissies worden beheerd
$M_{\text{MR in}}$	Hoeveelheid materiaal dat de cyclus ingaat en afkomstig is van recycling en hergebruik uit een vorige cyclus
$M_{\text{MR out}}$	Hoeveelheid materiaal dat de cyclus verlaat en wordt teruggewonnen (recycling en hergebruik) voor een volgende cyclus
ODP	Ozone Layer Depletion Potential
R260Mn	Staalsoort. R260Mn is de meest gebruikte staal­soort van de spoorstaven die vrijkomen voor de voetgangerstraverse
S235JR	S staat voor structural ofwel constructie staal , 235 is de vereiste minimale vloeispanning f_y in N/mm ² . De toevoeging JR geeft de minimale kerfslagwaarde van 27 J, bij een beproevingstemperatuur van 20°C. Deze kerfslagwaarde heeft een relatie met de beuktaaiheid.
UIC 54 ^{E1}	Spoorstaventype Dit profiel is internationaal bekend onder UIC 54
Vignola profiel	speciaal spoorstaaf profiel ontwikkeld met een staal­soort, R260Mn
VW	Veiligheids­waarde: Waarde die ProRail stelt aan spoorstaven, welke onder geen beding mag worden gepasseerd

Bibliografie

- Aan de Stegge BV. (2018). *www.adst.nl*.
- Arcadis. (2011). *Stationsgebied Driebergen-Zeist Fase 2B*.
- Arcadis. (2011). *Stationsgebied Driebergen-Zeist Planstudie fase 2B, 0756646080:C*. Amersfoort.
- Bouwen met staal. (2001). *Demonstratieproject IFD-bouwen in vernieuwende staalframebouw*. Bouwen met staal.
- Bouwen met Staal. (2014). *EPD Heavy Construction Products*. Zoetermeer: Bouwen met Staal.
- Braam, D. I. (2010). *Constructieleer Gewapend Beton*. Boxtel: Aeneas Media.
- DHV. (2010). *Dominantie-analyse scope 3*. Amersfoort.
- Diamond, J. (2004). *Ondergang*. Houten: Uniboek.
- dutchengineering. (2018, 08 01). Opgehaald van Dutchengineering downloads: <https://www.dutchengineering.nl/Nederlands/page/Website/Downloads/e/p/m/84/>
- en.demarec.nl. (2018, maart 6). *en.demarec.nl*. Opgehaald van Demarec RC-30 Rail Cutter: <http://en.demarec.nl/portal/products/rail-cutter>
- Esveld, P. C. (2005). *Geometrisch en constructief ontwerp van wegen en spoorwegen Deel D*. Delft: TU Delft.
- Europese commissie. (2015). *Mededeling van de commissie aan het Europees parlement, de Raad, het Europees economisch en sociaal Comité en het comité van de Regio's*. Brussel: Europese Commissie.
- Grunbauer. (2018). Opgehaald van <http://www.grunbauer.nl/ned/thq-kolomverbinding.htm>.
- Hagelaars, J. (2015, december 14). *Klimaatverandering*. Opgehaald van COP21-Het klimaatakkoord van Parijs: <https://klimaatverandering.wordpress.com/2015/12/14/cop21-het-klimaatakkoord-van-parijs-2015/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change*. WMO UNEP.
- Janssens, B. (2014, oktober 12). *Over duurzaamheid*. Opgehaald van zeelandnet.nl: <http://www.zeelandnet.nl/weblog/bduurzaam/bericht/215315?setcookie=true>
- Jonkers, D. H. (2018). *Materials & Ecological Engineering*. Delft: TU Delft Faculty of Civil Engineering & Geosciences.
- Keeling, C. D. (2018). *Britannica Online Encyclopedia*. Opgehaald van <https://www.britannica.com/media/full/1418908/109623>
- Leibnitz institute of Marine Sciences. (2008). *Will Global Warming Take a Short Break? Improved predictions suggest a reduced warming trend*. Kiel: Leibnitz institute of Marine Sciences.
- Leibniz Institute of Marine Sciences. (2008). *Will Global Warming Take a short Break? Improved climate predictions suggest a reduced warming trend during the next 10 years*. Berlin: Leibniz Institute of Marine Sciences.
- Ministerie Economische zaken. (sd). *Nederland Circulair in 2050*. Den Haag.

Ministerie van Economische Zaken. (sd). *Nederland Circulair in 2050*. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken.

Nederlands Normalisatie Instituut. (2011). *NEN-EN 1991-1-1*. Delft: Nederlands Normalisatie Instituut.

Nederlandse Norm. (2017). *NEN-EN 13674-1+A1*. NEN.

(2017). *NEN-EN 13674-1:2011 + A1:2017*. NEN.

ProRail. (2010). *CO2 Ketenanalyse spoorstaven Scope 3*. Utrecht: ProRail.

ProRail. (2012). *Spoorstaafgebreken*.

ProRail. (2015). *Instandhoudingsspecificaties*. ProRail.

ProRail. (2016). *Identificatie en typering van spoorstaafdefecten*.

ProRail Productbeheer. (2005). *Instandhoudingsdocument*.

R.Blok. (2014). *Tabellen voor bouw- en waterbouwkunde 10e druk*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.

RDW. (2012). *regelingen voertuigen*.

RHDHV. (2017). *Dominantieanalyse scope 3 CO2 - emissies*. Amersfoort: RHDHV.

SBR-CUR-net. (2015). *Bepaling van de milieuprestaties van gebouwen en gww-werken*.

Stark, J. S. (2009). *Staal-beton*. Zoetermeer: Bouwen met Staal.

stationsgebied Driebergen-Zeist. (2018). Opgehaald van <https://www.youtube.com/watch?v=ZOFGapzIlf0>

Stufib - Stutech. (2015). *Duurzaamheid als ontwerpcriterium voor beton - toegespitst op CO2*. Delft: Stufib.

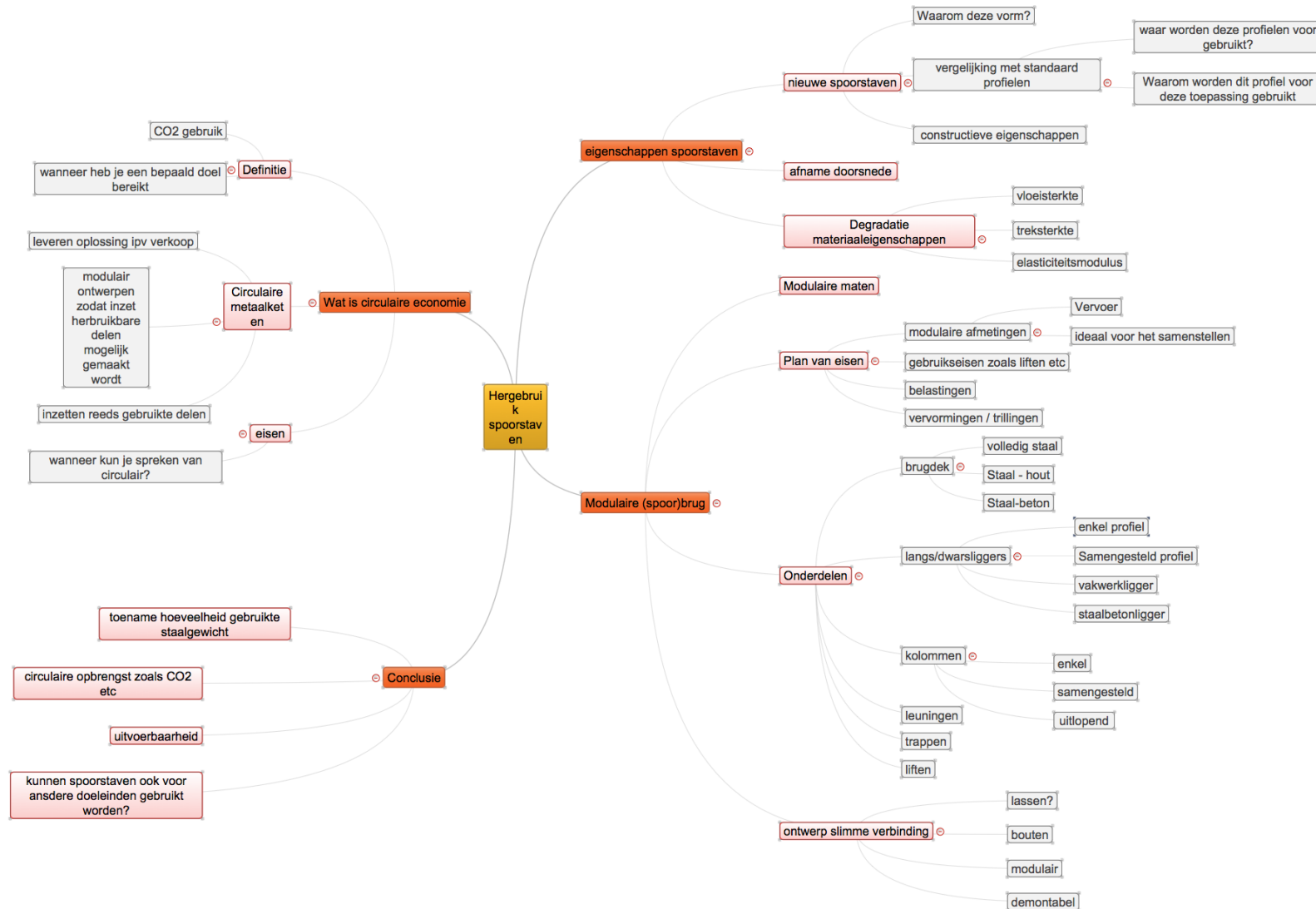
Technical Committee CEN / TC 350. (2017). *EN 15804 Sustainability of construction works*. Nederland Normalisatie Instituut.

TNO. (2014). *Visie op de circulaire economie voor de spoorsector*. Utrecht: TNO.

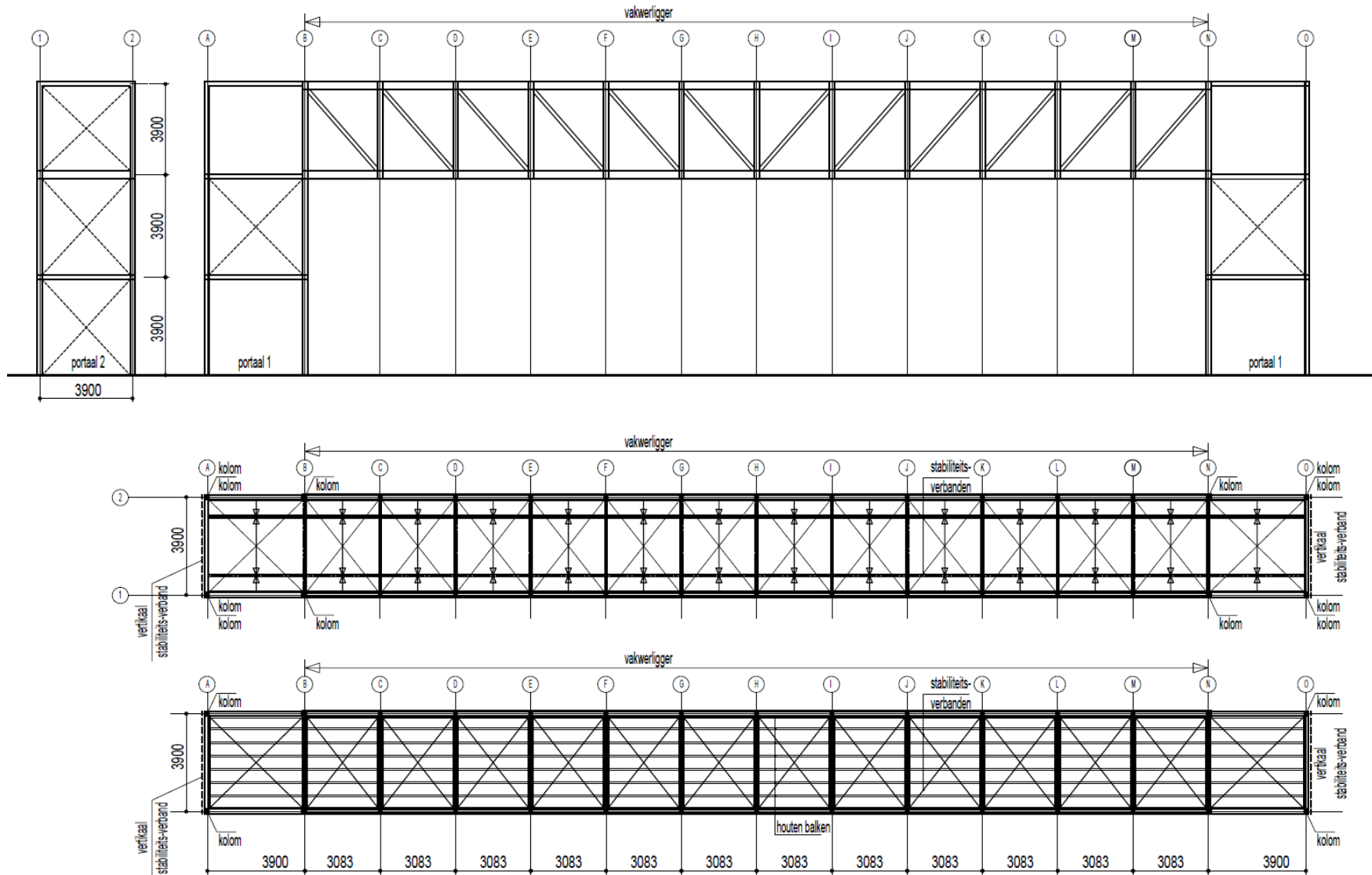
Treinreiziger.nl. (2009, november 17). *ProRail bouwt perron nieuwe stijl op station Leiden Centraal*. Opgehaald van <https://www.treinreiziger.nl/prorail-bouwt-perron-nieuwe-stijl-op-station-leiden-centraal/>

University of California San Diego. (2018). *Scripps Institution of Oceanography*. San Diego: University of California San Diego.

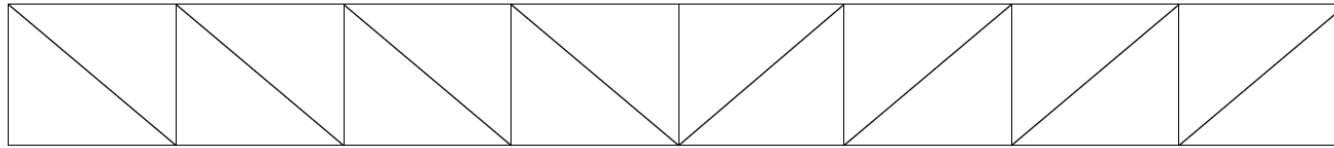
Bijlage 1 Mindmap



Bijlage 2 Constructief ontwerp traverse

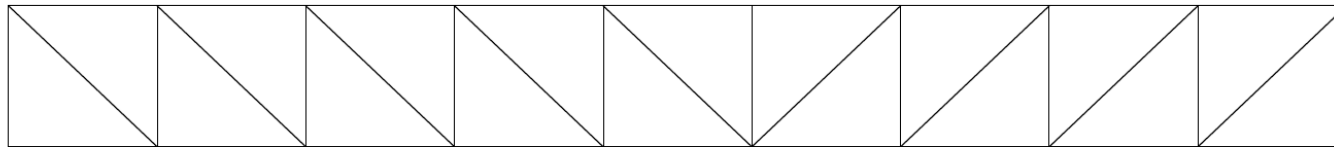


Bijlage 3 Indeling vakwerkligger traverse



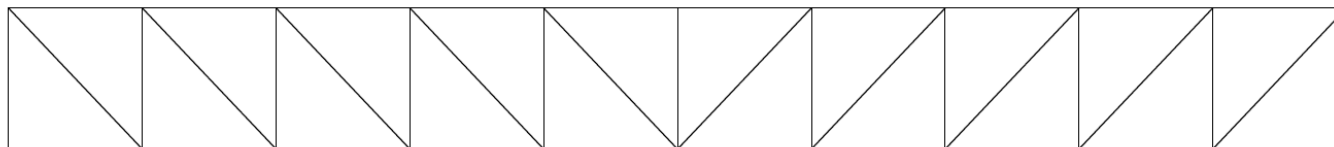
Optie n = 8 symmetrisch

8 * 4625



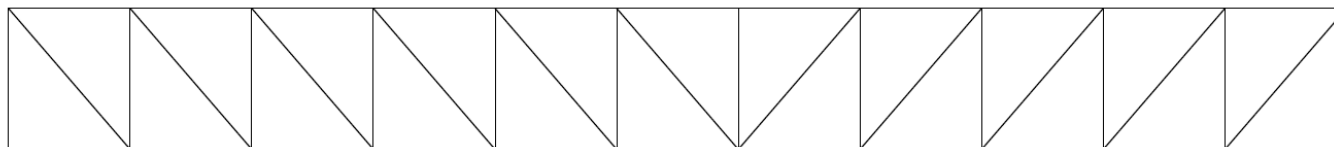
Optie n = 9 asymmetrisch

9 * 4111



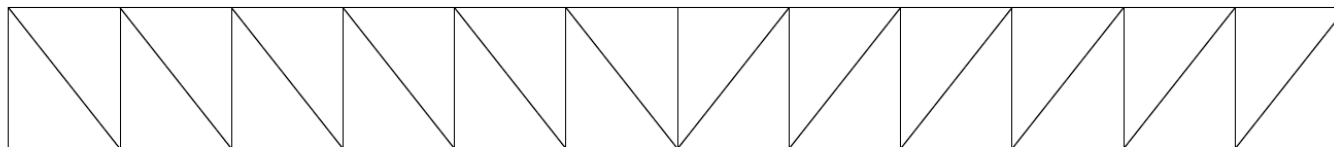
Optie n = 10 symmetrisch

10 * 3700



Optie n = 11 asymmetrisch

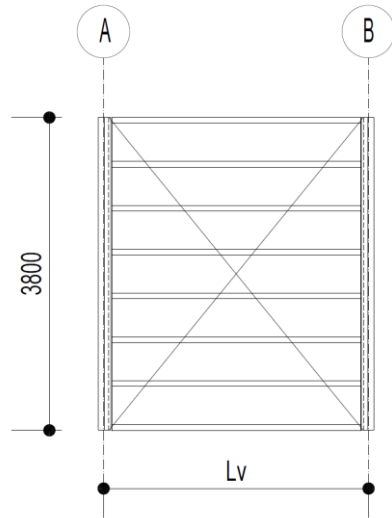
11 * 3364



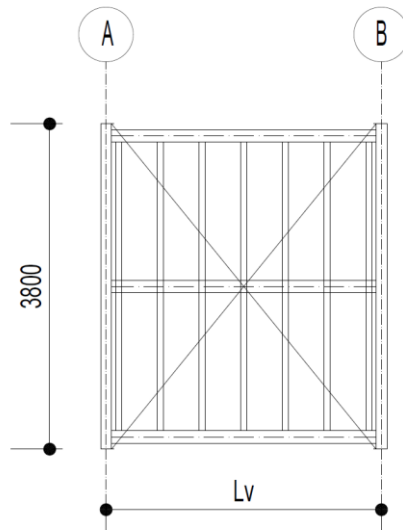
Optie n = 12 symmetrisch

12 * 3083

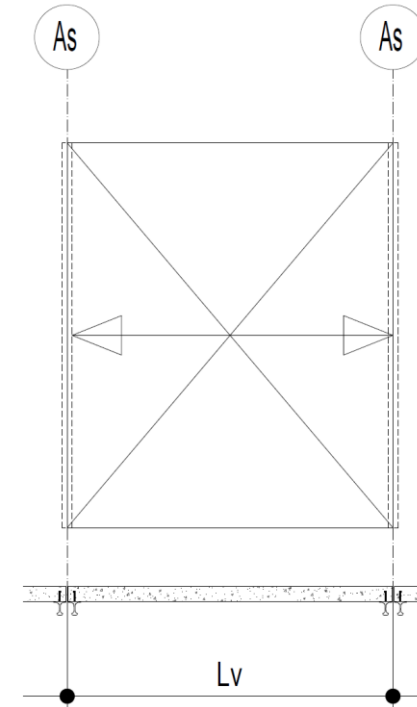
Bijlage 4 Varianten vloerconstructie



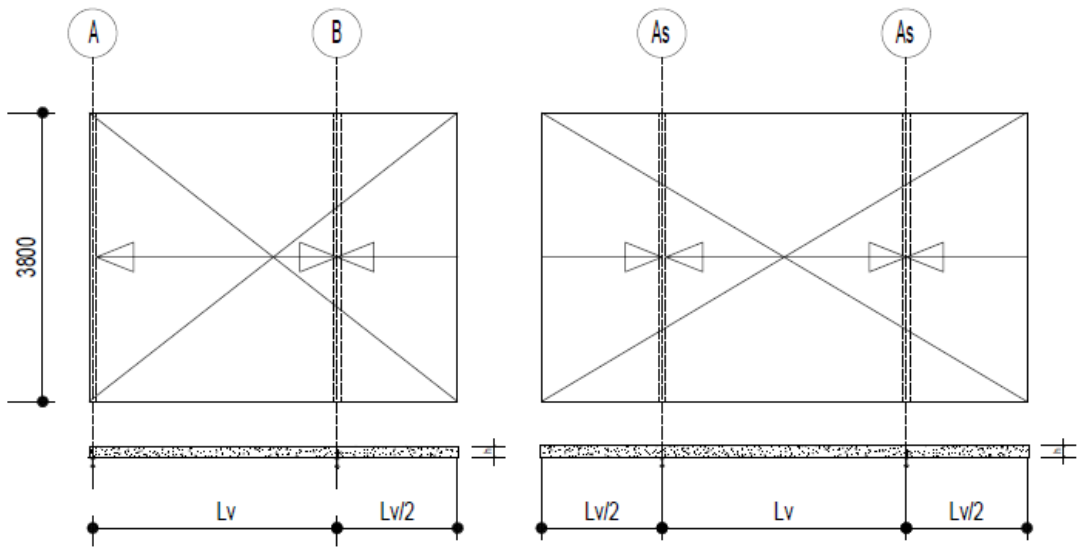
Figuur B4-1: Belastingafdracht houten vloer H1



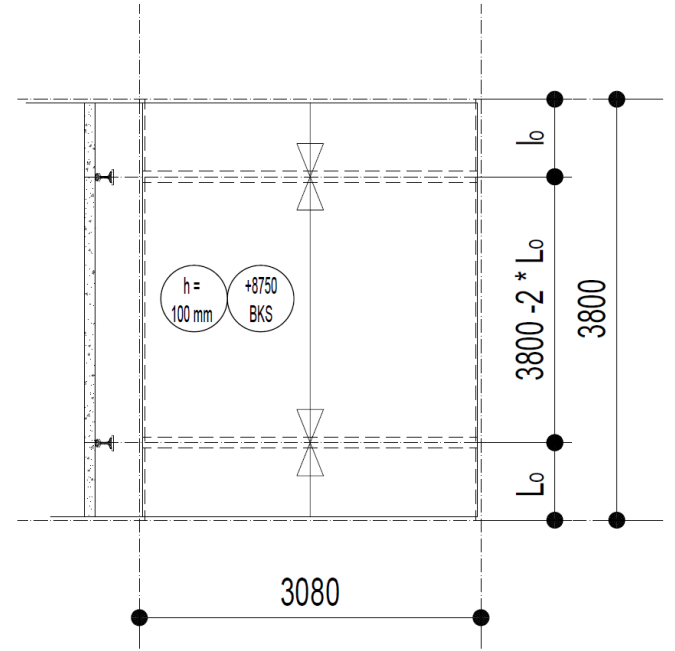
Figuur B4-2: Alternatief belastingafdracht houten vloer, H2



Figuur B4-3: Massieve betonnen vloer als enkel veld, B1.1



Figuur B4-4: Eind- en midden-element massieve vloer met doorsneden, B1.2

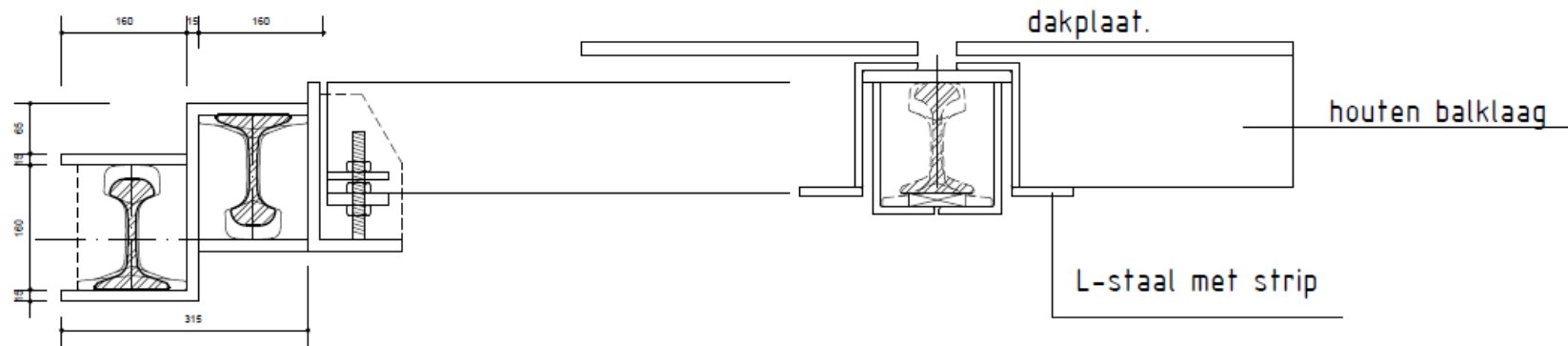


Figuur B4-5: Vloer-element met 2 overstekken, optie B2

Bijlage 5 Beslissingsmatrix

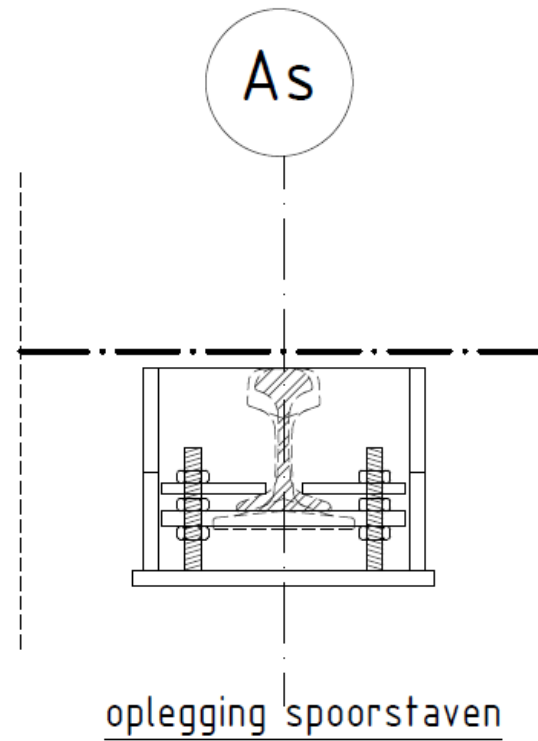
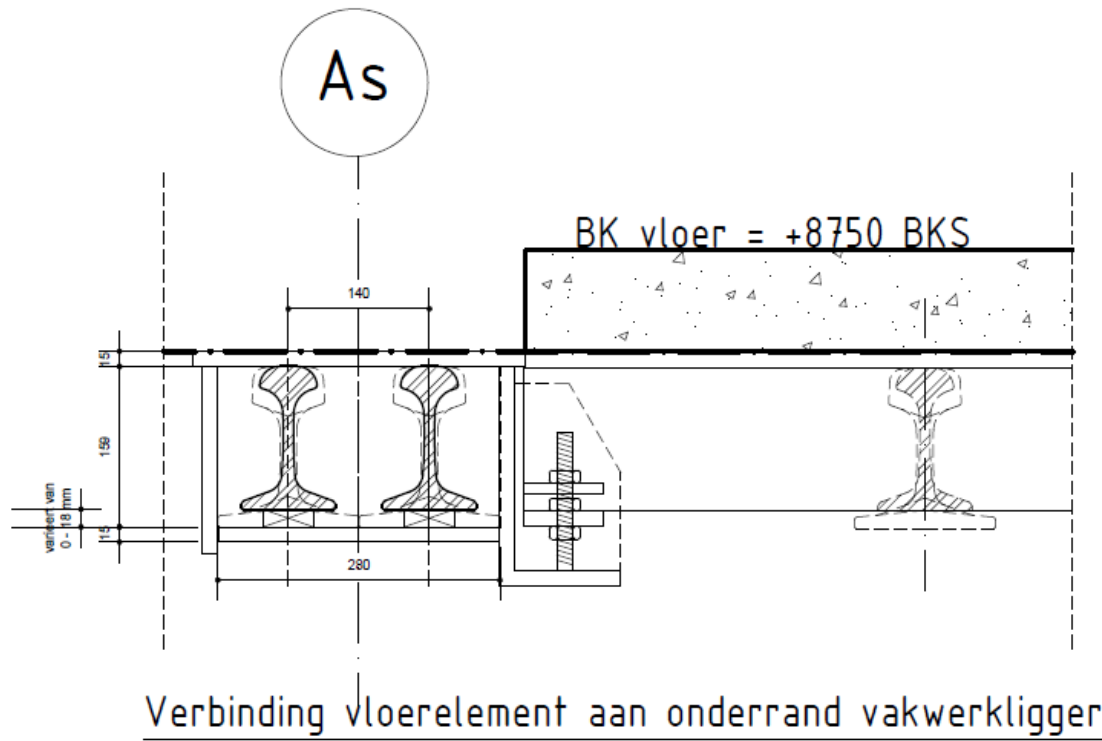
Beslissingsmatrix																									
optie	n=8					n=9					n=10					n=11					n=12				
Lv [m]	4625					4111					3700					3364					3083				
helling diagon. [α°]	40.1					43.5					46.5					49.2					51.7				
Σ lengte staven [m]	157					164					171					177					184				
%	100%					104%					109%					113%					117%				
	gewicht elementen	staaf lengte	kans en mogelijkheid optimalisatie	uitvoering en comfort		gewicht elementen	staaf lengte	kans en mogelijkheid optimalisatie	uitvoering en comfort		gewicht elementen	staaf lengte	kans en mogelijkheid optimalisatie	uitvoering en comfort		gewicht elementen	staaf lengte	kans en mogelijkheid optimalisatie	uitvoering en comfort		gewicht elementen	staaf lengte	kans en mogelijkheid optimalisatie	uitvoering en comfort	
weegfactor	2	1	3	2		2	1	3	2		2	1	3	2		2	1	3	2		2	1	3	2	
Vloer hout H1	1	1	-1	-1	-2	1	1	-1	-1	-2	1	1	-1	-1	-2	1	0	0	0	2	1	0	0	0	2
Vloer hout H2	1	1	-1	0	0	1	1	-1	0	0	1	1	-1	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	2
vloer massief B1.1	-1	1	-1	0	-4	-1	1	-1	0	-4	-1	1	-1	0	-4	-1	0	0	0	-2	-1	0	0	0	-2
vloer massief B1.2	-1	1	-1	0	-4	-1	1	-1	0	-4	-1	1	-1	0	-4	-1	0	0	0	-2	-1	0	0	0	-2
vloer massief B2	0	1	0	1	3	0	1	0	1	3	0	1	0	1	3	0	0	1	1	5	0	0	1	1	5
Vloer staalplaat-beton SB1.1	-1	1	-1	-1	-6	0	1	-1	-1	-4	0	1	-1	-1	-4	0	0	0	-1	-2	0	0	0	-1	-2
Vloer staalplaat-beton SB1.2	-1	1	-1	-1	-6	-1	1	-1	-1	-6	-1	1	-1	-1	-6	-1	0	0	-1	-4	-1	0	0	-1	-4
Vloer staalplaat-beton SB2	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	3	0	0	1	0	3
Dak hout	1	1	-1	1	2	1	1	-1	1	2	1	1	-1	1	2	1	0	0	1	4	1	0	0	1	4
Dak staal	1	1	-1	-1	-2	1	1	-1	-1	-2	1	1	-1	-1	-2	1	0	0	-1	0	1	0	0	-1	0

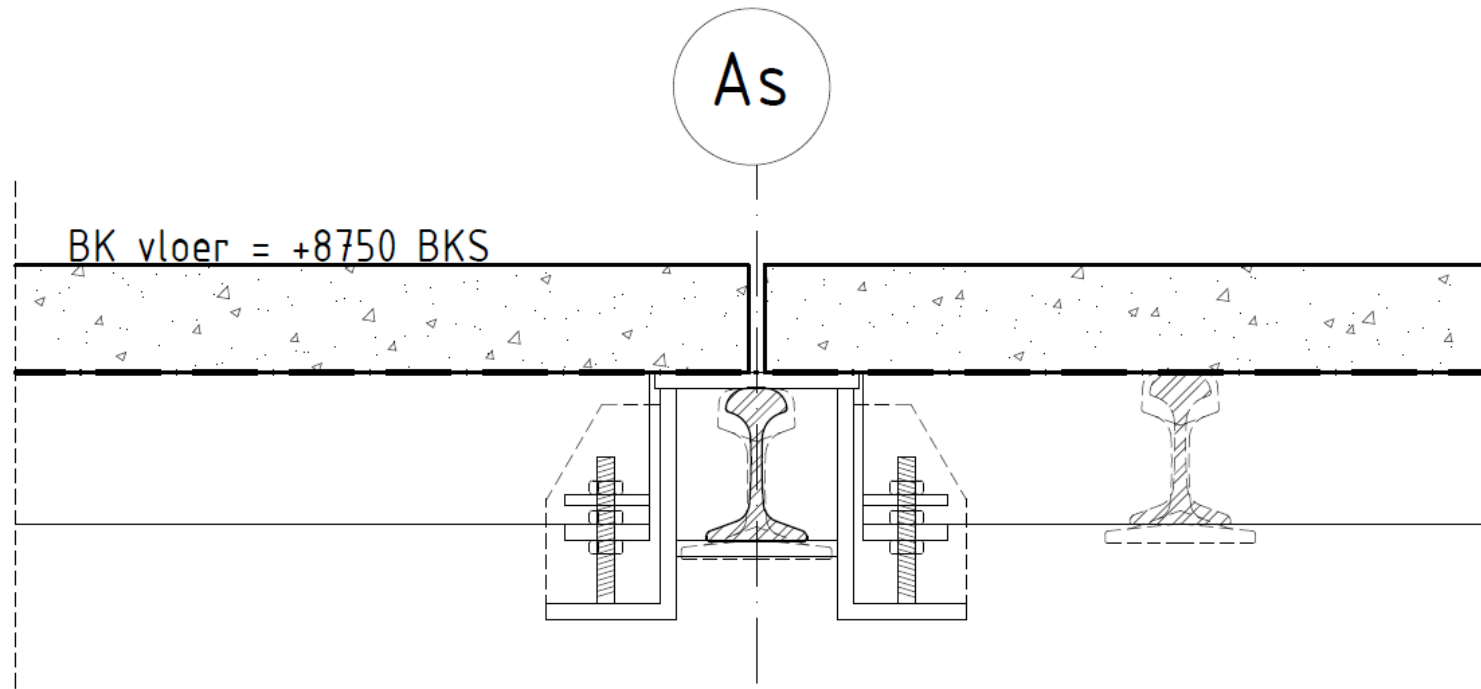
Bijlage 6 Verbindingen vloer- en dak-elementen aan de vakwerkliggers



Verbinding dakligger aan bovenrand vakwerkligger

oplegging dakelement op dakligger





BK vloer = +8750 BKS

Verbinding vloerelement aan primaire vloerligger