

Het 2e leven van spoorstaven in een modulaire
demontabele spoortraverse

DEELRAPPORT 4
CONSTRUCTIEVE UITWERKING
VOORKEURSVARIANT IN SPOORSTAVEN

MARTIJN ZEGERS

Versie 14 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

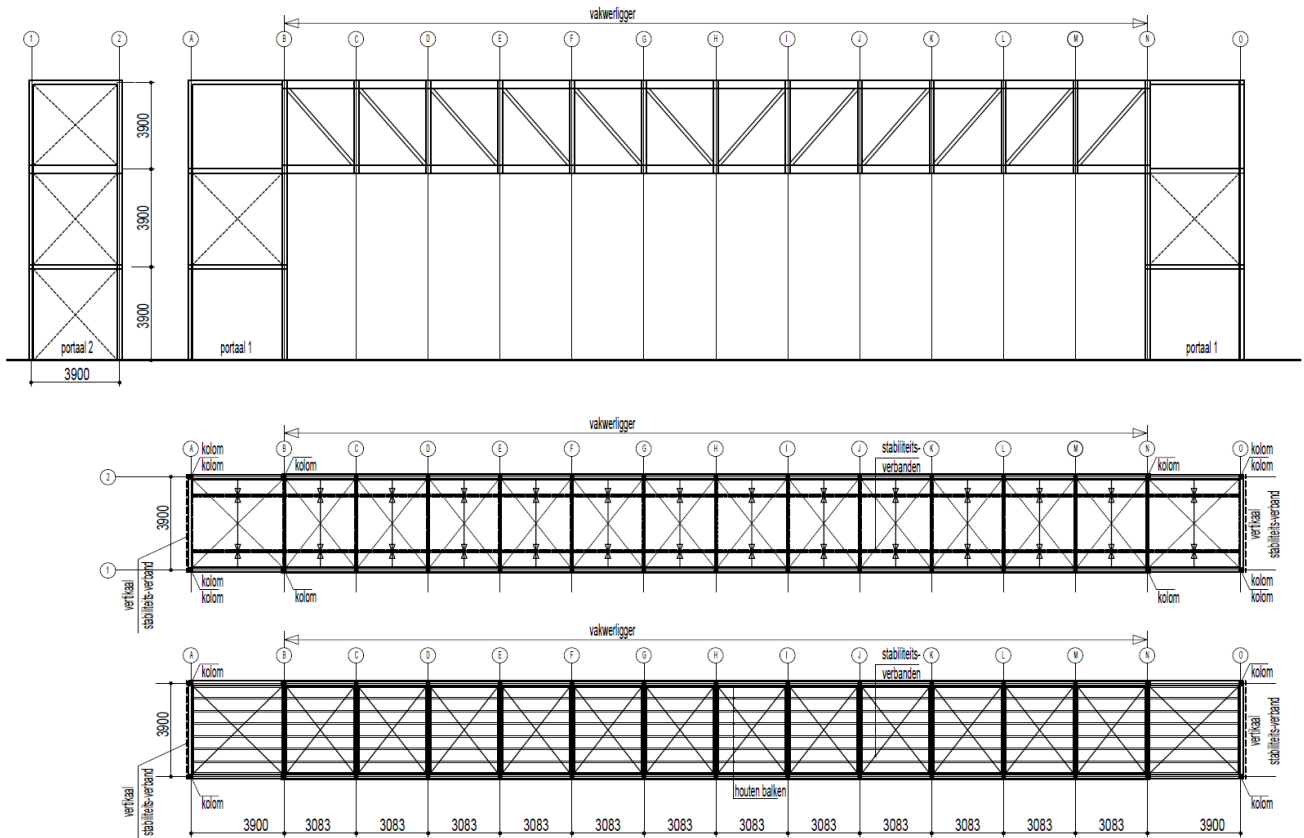
Vakcode: Module 3.4 Proeve van bekwaamheid

Inhoudsopgave

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Inleiding..... | 3 |
| 2. | Modellering..... | 4 |
| 2.1 | Materiaaleigenschappen | 4 |
| 2.2 | Doorsnede eigenschappen. | 7 |
| 2.3 | Constructie..... | 9 |
| 2.4 | Belastingen..... | 10 |
| 2.4.1 | Belastingen op de vakwerkligger | 11 |
| 2.4.3 | Belastingen op de portalen..... | 12 |
| 3. | Handberekeningen..... | 13 |
| 3.1 | Dakligger. | 13 |
| 3.2 | Vloerligger..... | 14 |
| 3.3 | Vakwerkligger. | 20 |
| 3.3.1. | Constructieve beschouwing van de vakwerkligger | 20 |
| 3.3.2. | Toetsing bovenrand van de vakwerkligger op instabiliteit..... | 22 |
| 3.3.3. | Toetsing verticale staven van de vakwerkligger op instabiliteit..... | 27 |
| 4. | Conclusie | 29 |
| 5. | Bibliografie | 30 |
| | Bijlage 1 Ontwerp traverse | 32 |
| | Bijlage 2 Exelsheet doorsnedeberekening normdoorsnede..... | 33 |
| | Bijlage 3 Exelsheet doorsnedeberekening gedegradeerde doorsnede..... | 34 |

1. Inleiding.

In het deelrapport 3, 'Ontwerp Traverse', zijn de afmetingen van de traverse, de belastingen op de traverse en de maximale te vervoeren afmetingen van elementen vastgelegd. Ook zijn bepaald hoe de dak-, vloer en gevelelementen zijn opgebouwd. Met deze gegevens is het constructieve ontwerp, zie Figuur 1-1 van de vastgestelde voorkeurstraverse uitgetekend. In *bijlage 1* is het ontwerp op A3 formaat bijgevoegd.



Figuur 1-1: Constructief ontwerp traverse

In dit deelrapport, 'Constructieve uitwerking voorkeursvariant in spoorstaven' is in hoofdstuk 2 de modellering behandeld van de materialen, de doorsneden, de statische schema's en de belastingen.

In hoofdstuk 3 zijn achtereenvolgens de materiaaleigenschappen, de doorsnedegrootheden en de belastingen gemodelleerd, zodat in hoofdstuk 4 de dak, vloer- en vakwerkliggers met handberekeningen getoetst konden worden.

2. Modelling

In dit hoofdstuk zijn de modelleringen van materiaaleigenschappen, de doorsnedegrootheden, de statische schema's en de belastingen op de constructieve elementen verantwoord. Zonder een correcte modellering kan geen correcte constructieve betrouwbaarheid worden aangetoond.

2.1 Materiaaleigenschappen

In paragraaf 3.2 van het literatuuronderzoek zijn de materiaaleigenschappen van spoorstaven onderzocht.

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. Deze staalsoort heeft, door een speciale chemische samenstelling, een hoge (Brinell) hardheid om snelle slijtage van de spoorstaven te voorkomen.

Staalsoort R260Mn is de meest gebruikte staalsoort van de spoorstaven die vrijkomen voor de voetgangerstraverse. Doordat R260Mn een andere chemische samenstelling heeft dan constructiestaalsoorten voor bouwconstructies, zoals S235 en S355, zijn de mechanische eigenschappen significant anders.

In Tabel 2-1 zijn de belangrijkste minimale mechanische eigenschappen weergegeven van R260Mn volgens NEN-EN 13674-1.

Tabel 2-1: Materiaaleigenschappen R260Mn, volgens NEN-EN 13674-1.

| Profiel UIC 54 | | | |
|---------------------------------------|-----------|--|-------------------|
| materiaaleigenschappen R260 en R260Mn | | | |
| treksterkte | 880 | | N/mm ² |
| breukrek | 10 | | % |
| Brinell hardheid | 260 - 300 | | -- |

Paragraaf 3.1 van NEN-EN 1993-1-1, Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 1-1 (Nederlands Normalisatie Instituut, 2011), vermeldt dat deze norm ontwerp en berekeningen van de uit tabel 3.1 aangegeven staalsoorten dekt. Dit zijn uitsluitend constructiestaalsoorten, deze worden aangegeven met een S.

Dit betekent dat de regels uit deze norm NIET gebruikt mogen worden.

Navolgend wordt onderzocht hoe de bovenstaande eigenschappen, Tabel 2-1 aansluiten bij NEN-EN 1993-1-1.

Paragraaf 3.2.1 uit NEN-EN 1993-1-1 geeft in eveneens tabel 3.1 de waarden aan voor de vloeigrens f_y en de treksterkte f_u . Verder geeft de norm 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 ($=f_u$).

Een belangrijke eigenschap, die niet vermeld is, in de NEN -EN13674-1, is de vloeigrens. In het geval van de spoorstaven is er geen zichtbare vloeigrens en moet derhalve de 0,2% rekgrens aangehouden worden als fictieve vloeigrens. Bij Dekrail, en Prorail wordt veel onderzoek gedaan naar chemische samenstellingen, materiaaleigenschappen en gebreken aan spoorstaal. Bij experts van deze bedrijven is navraag gedaan en ook bij hen is geen vloeigrens van staalsoort R260Mn bekend. In (Esveld, 2005) is een tabel gevonden met een verwijzing naar een vloeigrens, zie Tabel 2-2. Hieruit is middels rechtlijnige interpolatie een vloeigrens berekend op basis van een treksterkte van 880 N/mm² van 565 N/mm².

Tabel 2-2: Materiaaleigenschappen (Esveld, 2005)

| Toelaatbare buigspanning railvoet (σ_{rf}) | | | | | |
|---|--------------------------------|------------------------|---|--|--|
| Treksterkte σ_t [MPa] | Vloeigrens σ_y [MPa] | Constante spanningen | | σ_{rf} [MPa] voor incidentele belasting | σ_{rf} [MPa] voor herhaalde belasting |
| | | Richtspanning [MPa] | Temperatuurspanning voegloos spoor [MPa] | | |
| 700 | 450 | 220 | 100 | 450 | ~55* |
| 900 | 580 | | | 580 | 220* |

* uit Smith diagram

NEN-EN 1993-1-1 geeft in paragraaf 3.2.2 ductiliteitseisen aan. Met behulp van deze eisen wilt met plotselinge materiaalbreuk voorkomen, want de constructie kan vervormen 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 $\epsilon_y = f_y/E$

Tabel 2-3: Vergelijk materiaaleigenschappen aan NEN-EN 1993-1-1

| 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 |

De waarden voor de breukrek ϵ_u in Tabel 2-3 zijn minimale waarden, die uit de productnormen komen. Deze kan ook proefondervindelijk bepaald worden met de een proefstuk dat voldoet aan: $L = 5,65 * \sqrt{A_0}$,
Hierin is:

- L de lengte van het proefstuk
- A₀ de oppervlakte van de initiële dwarsdoorsnede.

| Werkstoff : Material / Matériaux | | R260 Mn | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|--|---|--|-------------------------------------|--------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-----|------|------|----|
| Lieferbedingungen: Terms of delivery Stipulations de la commande | | SPC 00011/VERSION004 | | | | | | | | | | | | | | |
| Umfang der Lieferung: Extent of delivery / Liste descriptives | | siehe Lieferschein : 5110068003 see Dispatch note / Avis d'expédition | | | | | | | | | | | | | | |
| Ergebnis der Prüfungen/ Test results / Result des essais Seite 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schmelze Nr. | Walz Nr. | Streckgrenze | Zugfestigkeit | Dehnung | Brinell-Härte | Reinheitsgrad (K3) | C | Si | Mn | P | S | Al | H | Cr | Ni | O |
| Cast No. No. de coulée | Rolling No./ Numero courant | Yield stress limite d'élasticité N/mm ² | Tensile strength Résistance à la traction N/mm ² | Elongation Allongement L ₀ =5d % | 0,5 mm unter Fahrtische HB 30 | (n. DIN 50602) | % | % | % | % | % | % | ppm | % | % | % |
| 404140 | 6879 | | 936 | 14,1 | 269 | 0 | 0,65 | 0,30 | 1,39 | 0,011 | 0,011 | 0,001 | 0,8 | 0,02 | 0,01 | 11 |
| 405025 | 7054 | | 940 | 14,0 | 275 | | 0,66 | 0,30 | 1,37 | 0,010 | 0,012 | 0,001 | 0,7 | 0,02 | 0,01 | |
| 405024 | 7379 | | 928 | 14,2 | 268 | | 0,64 | 0,33 | 1,37 | 0,013 | 0,016 | 0,001 | 0,9 | 0,02 | 0,01 | |
| 405022 | 7381 | | 942 | 14,0 | 274 | | 0,65 | 0,33 | 1,38 | 0,014 | 0,012 | 0,001 | 0,9 | 0,02 | 0,02 | |
| 405019 | 7384 | 515 | 949 | 14,4 | 274 | 0 | 0,65 | 0,31 | 1,35 | 0,015 | 0,013 | 0,001 | 1,2 | 0,03 | 0,01 | 8 |

Figuur 2-1: Certificaat Corus spoorstaaf UIC 54^E1, R260Mn

Figuur 2-1 geeft het certificaat van een spoorstaaf weer. Hierin is de breukrek aangegeven met Dehnung. De grootte van de breukrek ligt tussen 14,0 en 14,4 %. Dit certificaat geldt voor de levering 5110068003. In de vrachtbrief staan de kenmerken van de staven waarvoor dit certificaat geldt. Derhalve is van iedere staaf een “paspoort” beschikbaar.

Iedere spoorstaaf heeft een uniek gestanst, kenmerk. Het kenmerk verwijst naar de certificaten. In het certificaat zijn de staalsoort met daarbij de treksterkte en de breukrek te achterhalen. Bij een toepassing van spoorstaven voor constructieve doeleinden, is het derhalve raadzaam deze certificaten van de te gebruiken spoorstaven op te vragen en hiermee de definitieve materiaaleigenschappen vast te stellen.

IMD Raadgevend Ingenieursbureau heeft voor het project Hoogstraat te Rotterdam gebruik gemaakt van 2^e-hands staalprofielen, een zogenaamd donor-skelet. Ondanks het ontbreken van materiaalgegevens is er geen (destructief) materiaalonderzoek verricht, zoals een trekproef.

Er is daarom, vanuit veiligheidsoverwegingen, een toelaatbare spanning van 75 % van de vloeispanning van S235 is 175 N/mm² aangehouden.

In de literatuur is onderzocht en bij experts navraag gedaan of er in de gebruiksfase van het 1^e leven van de spoorstaaf degradatie van de materiaaleigenschappen opgetreden zou kunnen zijn. Dit blijkt niet onderzocht te zijn, maar is onwaarschijnlijk vanwege de lage gemiddelde spanningen, ten gevolge van de treinbewegingen, die in de spoorstaven optreden. Ten gevolge van het slijpen van de spoorstaven treden slechts tot een zeer geringe diepte veranderingen in de structuur van het staal op. Na enige treinbewegingen zijn deze structuurveranderingen weggesleten.

Conclusie: 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.

Met behulp van een reductiefactor op de vloeigrens, uit Tabel 2-3, ter grootte van de breukrek uit de productnorm gedeeld door de vereiste breukrek uit NEN-EN 1993-1-1 wordt een fictieve vloeigrens vastgesteld. Vanwege het ontbreken van gegevens uit destructief onderzoek naar mogelijke degradatie van de materiaaleigenschappen wordt de reductie zoals IMD heeft toegepast ook aangehouden.

Hierdoor wordt de vloeigrens voor de berekeningen als volgt vastgesteld:

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

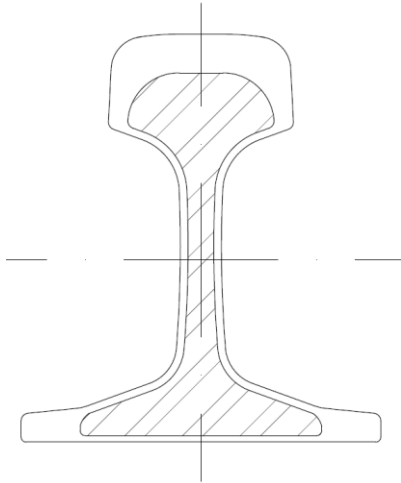
Als aanbeveling wordt meegegeven, om voorafgaand aan de toepassing van spoorstaven als constructie-element, de mechanische eigenschappen door middel van destructief materiaalonderzoek vast te stellen.

2.2 Doorsnede eigenschappen

Spoorstaven komen uit grote vervangingsprojecten vrij omdat door slijtage en/of corrosie de BodemWaarde (BW) of de VeiligheidsWaarde (VW) niet meer gehaald wordt. Zie hiervoor literatuuronderzoek paragraaf 3.4

In Tabel 2-4 zijn de doorsnede-eigenschappen van het UIC 54^{E1} volgens NEN-EN 13674-1 weergegeven.

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 2-2 is de gedegradeerde doorsnede, gearceerd weergegeven ten opzichte van de normdoorsnede.



Figuur 2-2: Degradatie van de doorsnede van een spoorstaaf UIC 54^{E1}

De normdoorsnede en de gedegradeerde doorsnede zijn in autocad getekend. Om de doorsnedegrootheden te berekenen zijn de doorsneden opgedeeld in rechthoeken en driehoeken, waarbij zoveel mogelijk de doorsnede wordt gevolgd. In een Excel-sheet zijn alle rechthoeken en driehoeken met zwaartepunten geplaatst waarna de doorsnede grootheden middels de mechanische formules zijn berekend, *bijlage 2 en 3*.

Van het normprofiel zijn de doorsnede eigenschappen bekend. Dit heeft als verificatie van de toegepaste methode en de juistheid van de gemaakte Excel-sheet gediend. Afwijkingen zijn kleiner dan 1%.

In Tabel 2-4 zijn de doorsnede eigenschappen van de norm- en de gedegradeerde doorsnede met elkaar vergeleken.

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

| Doorsnede UIC 54E1 zonder corrosie en slijtage | | | | |
|--|-------|------------------|-----------------|------|
| A | 6981 | | mm ² | 100% |
| h | 159 | | mm | 100% |
| b | 140 | | mm | 100% |
| I _y | 2357 | *10 ⁴ | mm ⁴ | 100% |
| z _{y,o} | 75,9 | | mm | |
| z _{y,b} | 83,1 | | mm | |
| W _{y,o} | 310,5 | *10 ³ | mm ³ | 100% |
| W _{y,b} | 283,6 | *10 ³ | mm ³ | 100% |
| I _z | 419 | *10 ⁴ | mm ⁴ | 100% |
| z _z | 70 | | mm | |
| W _z | 59,9 | *10 ³ | mm ³ | 100% |
| G | 54,8 | | kg/m | 100% |

| Doorsnede UIC 54E1 met corrosie en slijtage | | | | |
|---|-------|------------------|-----------------|-----|
| A | 3958 | | mm ² | 57% |
| h | 142 | | mm | 89% |
| b | 94 | | mm | 67% |
| I _y | 1106 | *10 ⁴ | mm ⁴ | 47% |
| z _{y,o} | 63,7 | | mm | |
| z _{y,b} | 78,3 | | mm | |
| W _{y,o} | 173,6 | *10 ³ | mm ³ | 56% |
| W _{y,b} | 141,3 | *10 ³ | mm ³ | 50% |
| I _z | 107 | *10 ⁴ | mm ⁴ | 26% |
| z _z | 65 | | mm | |
| W _z | 16,5 | *10 ³ | mm ³ | 28% |
| G | 31,1 | | kg/m | 57% |

Opgemerkt moet worden dat de doorsnedegrootheden zijn berekend voor de situatie, waarbij zowel de maximale slijtage EN de maximale corrosie de doorsnede hebben gedegradéerd. Dit is het meest ongunstigste scenario dat kan voorkomen. Met name het traagheidsmoment om de Z-as, I_z, heeft veel last van de degradatie.

Conclusie:

Bij een toelaatbare spanning van 280 N/mm^2 , zie paragraaf 2.1, kunnen de toelaatbare normaalkracht en het buigend moment worden bepaald:

- $N_{Rd,bruto} = 3958 * 280 = 1108 * 10^3 \text{ N} = 1108 \text{ kN}$, (zonder gatverzwakking door bouten)
- $N_{Rd,netto} = 0,9 * 1108 = 997 \text{ kN}$, (met 10 % gatverzwakking door bouten)
- $M_{Rd} = 141,3 * 10^3 * 208 = 39,6 * 10^6 \text{ Nmm} = 39,6 \text{ kNm}$

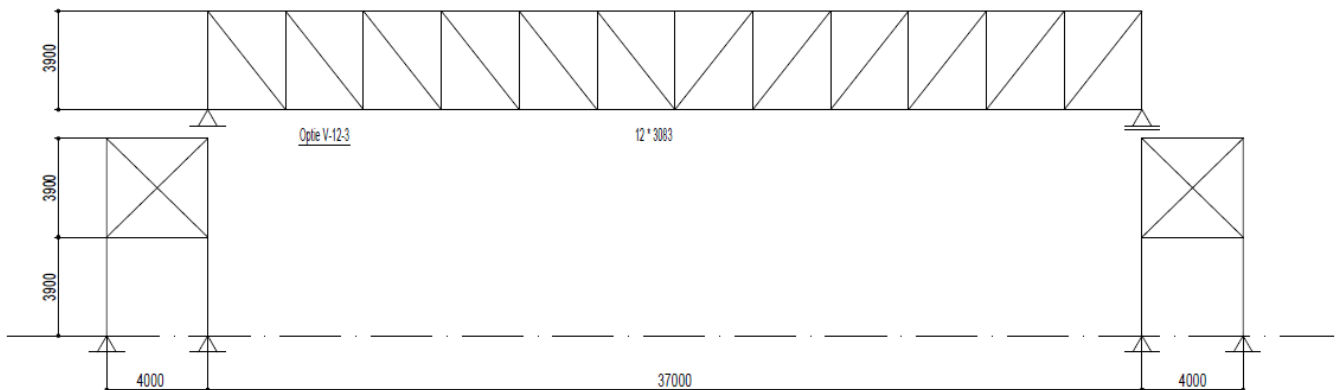
Bij bovenstaande waarden is geen rekening gehouden met de reductiefactor χ voor instabiliteit zoals kip en knik. Deze effecten zijn in de betreffende situaties berekend.

2.3 Constructie.

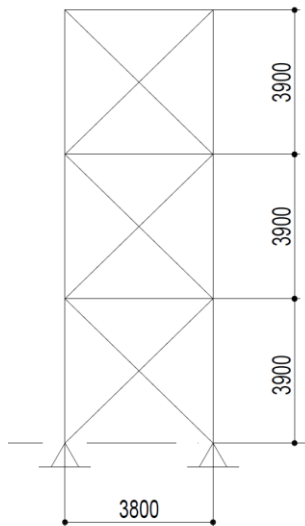
Allereerst wordt de constructie gemodelleerd voor een handberekening, welke in hoofdstuk 3 is uitgewerkt. Hiervoor moet de constructie opgesplitst worden in handzame delen, die handmatig te berekenen zijn. De modelleringen van de dak-elementen en vloer-elementen worden direct bij de berekeningen van deze elementen toegelicht. De constructie van de vakwerkliggers en de ondersteunende portalen zijn weergegeven in Figuur 2-3. De constructie is hiervoor opgesplitst in de vakwerkligger en 2 ondersteunende portalen (1).

Haaks hierop staan 2 portalen (2), die de stabiliteit voor wind op de langsrichting van de traverse moeten verzorgen, zie Figuur 2-4.

De portalen moeten behalve de verticale belastingen van eigen gewichten van materialen en de opgelegde belasting uit mensenmassa's ook de horizontale krachten uit wind, scheefstand en 2^e-orde naar de fundering afdragen. Om de verbindingen demontabel te maken moeten ze eenvoudig zijn en kunnen daardoor (bijna) geen momentverbindingen zijn. Derhalve zijn de opleggingen allen gemodelleerd als scharnierende opleggingen. De portalen worden niet verder uitgewerkt.



Figuur 2-3: Modellering vakwerkligger met ondersteunende portalen (1)



Figuur 2-4: Modelleringsportaal (2)

2.4 Belastingen

Een constructie is altijd onderhevig aan belastingen. Deze belastingen zijn vaak afkomstig uit zwaartekrachten en dus naar beneden gericht door de aantrekkingskracht van de aarde.

Er zijn ook horizontale krachten die op een constructie kunnen werken. Dit zijn meestal krachten ten gevolge van wind. Ook rem- en aanrijdbelastingen werken horizontaal maar deze worden door het treffen van aanrijdbeveiligingen buiten beschouwing gelaten.

De verticale belastingen komen uit eigen gewichten van bouw materialen maar ook van mensen, die gebruik maken van de traverse op de traverse-vloer, en sneeuw op het traverse-dak. Vanuit de dak- en vloer-elementen worden deze belastingen via de vakwerken en de portalen naar de fundering afgedragen.

De horizontale windkrachten op de gevels worden via de vakwerkliggers en de portalen eveneens afgedragen naar de fundering.

Omdat alle elementen bekend zijn, is van ieder element de permanente belasting berekend en weergegeven in Tabel 2-5.

Behalve permanente belastingen werken er ook veranderlijke belastingen op de verschillende elementen. De soorten en waarden zijn terug te vinden in het deelrapport 3 "Ontwerp traverse". Volledigheidshalve is het overzicht in Tabel 2-6 bijgevoegd.

Tabel 2-5: Permanente belasting van de elementen per eenheid

| Permanente belasting per eenheid van de elementenonderdeel | | | |
|--|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Permanent | | P_{Gk} kN/m ² | q_{Gk} kN/m ¹ |
| Dak | houten dakconstructie incl staal | 1,00 | |
| | Afwerking en installaties | 0,50 | |
| | Totaal $P_{Gk;dak}$ | 1,50 | |
| Vloer | massieve vloer h = 100 mm | 2,40 | |
| | stalen liggers 13,8 m*0,5 kN/m/(3,1*3,9) | 0,60 | |
| | Afwerking en installaties | 0,50 | |
| | Totaal $P_{Gk;vloer}$ | 3,50 | |
| Gevels | glasconstructie 3,4 * 1,00 kN/m ² | | 3,4 |
| | Totaal $q_{Gk;gevel}$ | | 3,4 |
| vakwerkl. | spoorstaven: 185 m * 0,5 kN/m / 37,0 m | | 2,5 |
| | Totaal $q_{Gk;gevel}$ | | 2,5 |

Tabel 2-6: Veranderlijke belastingen volgens tabel 1-2 Deelrapport 3 "Ontwerp traverse"

| Veranderlijke belastingen op traverse : | | | | | | | | |
|---|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|----------|----------|------------------------------|
| | Afkorting | Dak | Vloer | Gevels | Ψ_0 | Ψ_1 | Ψ_2 | opm. |
| | | kN/m ² | kN/m ² | kN/m ² | | | | |
| 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 | |

De windbelasting is niet interessant voor de vakwerkligger, echter wel voor de portalen. De handberekening van de vakwerkligger is uitsluitend op de combinatie van permanente, opgelegde en sneeuwbelasting uitgevoerd.

Hierbij zijn de belastingen als een gelijkmatig verdeelde belasting gemodelleerd om later in het 3 -D raamwerkmodel te controleren.

Voor het 3-D raamwerkmodel worden de belastingen direct op de betreffende staven ingevoerd.

2.4.1 Belastingen op de vakwerkligger

Op de bovenrand werken de belastingen uit de dak-elementen. Verder is de helft van de het gewicht van de vakwerkligger op de bovenrand gemodelleerd.

Ten behoeve van de handberekeningen zijn de belastingen:

$$q_{GK,BR} = 3,8/2 * 1,50 + 2,5 = 5,35 \text{ kN/m}^1$$

$$q_{QK,BR} = 3,8/2 * 0,56 = 1,06 \text{ kN/m}^1$$

Op de onderrand werken de belastingen uit de vloer-elementen en de gevels. Verder is de helft van de het gewicht van de vakwerkligger op de onderrand gemodelleerd.

Ten behoeve van de handberekeningen zijn de belastingen:

$$q_{GK,OR} = 3,8/2 * 3,70 + 3,4 + 2,5 = 12,93 \text{ kN/m}^1$$

$$q_{QK,OR} = 3,8/2 * 5,0 = 9,50 \text{ kN/m}^1$$

Om de betrouwbaarheid van de traverse aan te tonen, zie paragraaf 4.3 van het literatuuronderzoek, zijn vergelijkingen 6.10.a en 6.10.b van toepassing voor het vaststellen van de belastingwaarden waarop de constructie moet worden getoetst.

In het 3-D raamwerkmodel worden deze rekenwaarden via gegenereerde combinaties automatisch berekend.

Voor de handberekening geldt voor de bovenrand:

$$6.10.a: E_d = 1,5 * G_k + 1,65 * \psi_{0,1} * Q_{k,1}$$

$$\rightarrow q_{Ed} = 1,5 * 5,35 + 1,65 * 0 * 1,06 = 8,03 \text{ kN/m}^1.$$

$$6.10.b: E_d = 1,35 * G_k + 1,65 * Q_{k,1}$$

$$\rightarrow q_{Ed} = 1,35 * 5,35 + 1,65 * 1,06 = 8,97 \text{ kN/m}^1.$$

Voor de handberekening geldt voor de onderrand:

$$6.10.a: E_d = 1,5 * G_k + 1,65 * \psi_{0,1} * Q_{k,1}$$

$$\rightarrow q_{Ed} = 1,5 * 12,93 + 1,65 * 0,6 * 9,5 = 28,80 \text{ kN/m}^1.$$

$$6.10.b: E_d = 1,35 * G_k + 1,65 * Q_{k,1}$$

$$\rightarrow q_{Ed} = 1,35 * 12,93 + 1,65 * 9,5 = 33,13 \text{ kN/m}^1.$$

In beide situaties geeft vergelijking 6.10.b de grootste rekenwaarde.

2.4.3 Belastingen op de portalen.

In de constructie zitten in principe 2 verschillende portalen zie Figuur 1-1.

Portaal 1 verzorgt de stabiliteit tegen windbelasting op de kopse zijde van de traverse. Verder draagt dit portaal de belastingen uit een vakwerkligger, het bordes bij de lift en trap en belastingen op een deel van de trap af aan de fundering.

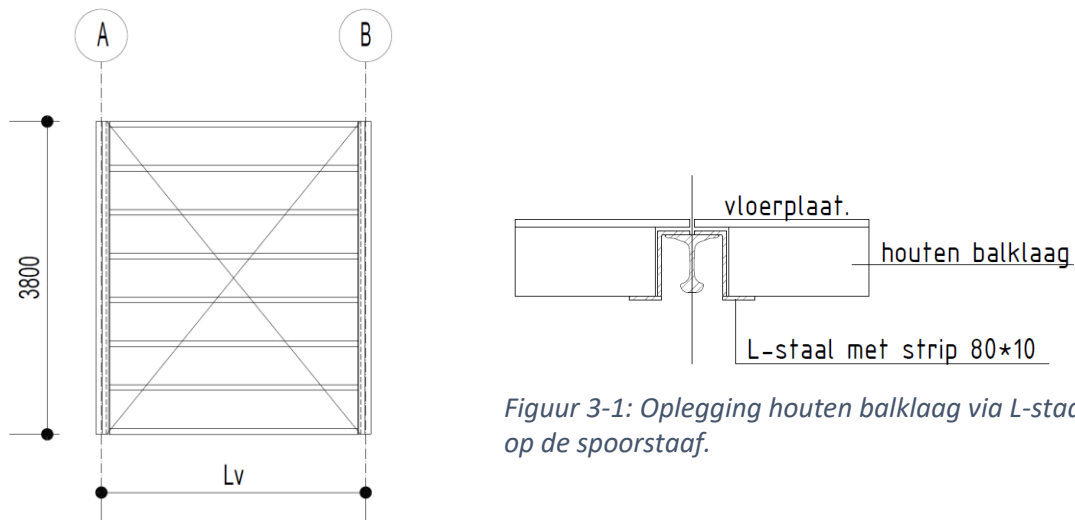
Portaal 2, de kopse zijden van de traverse, verzorgt de stabiliteit voor de windbelasting op de lange zijde van de traverse. Verder draagt dit portaal de belastingen uit het bordes bij de lift en trap en belastingen van een deel van de trap af aan de fundering.

3. Handberekeningen

Er zijn handberekeningen gemaakt voor alle onderdelen waarin spoorstaven zijn toegepast als constructief element. Zo zijn houten balklagen etc. niet relevant om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden en zijn derhalve niet berekend.

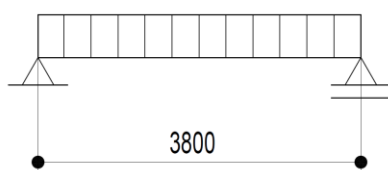
3.1 Dakligger.

De dakliggers dragen de dak-elementen en brengen de belastingen via L-stalen over naar de vakwerkliggers. Zie: Figuur 3-1 Figuur 3-2.



Figuur 3-2: Houten dakelement

In Figuur 3-3 is het statisch schema weergegeven waarmee de inwendige krachtwerving en doorbuiging van de dakligger is berekend.



Figuur 3-3: Statisch schema dakligger

De belastingen op de dakligger zijn:

$$q_{Gk} = 3,1 * 1,5 = 4,65 \text{ kN/m}^1.$$

$$q_{Qk} = 3,1 * 0,56 = 1,74 \text{ kN/m}^1.$$

$$6.10.a: q_{Ed} = 1,5 * 4,65 + 1,65 * 0 * 1,74 = 8,03 \text{ kN/m}^1.$$

$$6.10.b: q_{Ed} = 1,35 * 4,65 + 1,65 * 1,74 = 8,97 \text{ kN/m}^1.$$

$$M_{Ed} = 1/8 * 8,97 * 3,8^2 = 16,2 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 141,3 * 10^3 * 280 * 10^{-6} = 39,6 \text{ kNm}$$

Berekening doorbuiging:

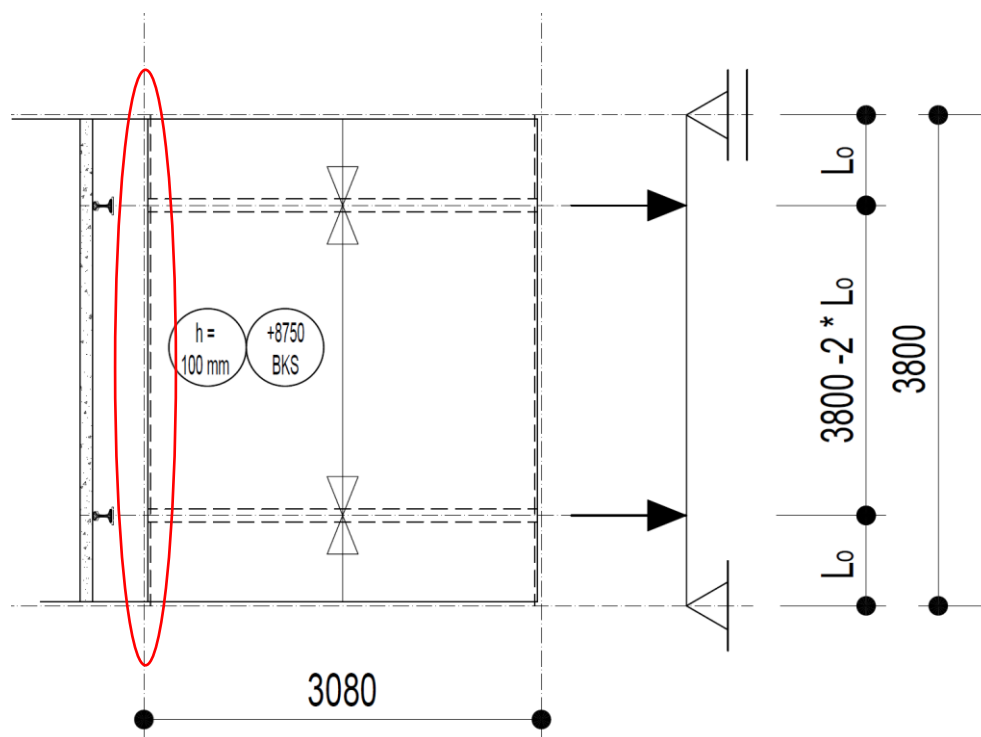
$$w_{eind} = \frac{5}{384} * \frac{(4,65 + 1,74) * 3800^4}{210000 * 1106 * 10^4} = 7,5 \text{ mm} \leq w_{max} 0,004 * 3800 = 15,2 \text{ mm}$$

Toetsing UGT: $UC = M_{Ed} / M_{Rd} = 16,2 / 39,6 = 0,41 \leq 1,0$ ☺

Toetsing BGT: $UC = w_{eind} / w_{max} = 7,5 / 15,2 = 0,49 \leq 1,0$ ☺

3.2 Vloerligger.

De vloerliggers dragen de belastingen van de vloer-elementen naar de vakwerkliggers, zie Figuur 3-4.



Figuur 3-4: Belastingafdracht vloer-element en het statisch schema van de omcirkelde vloerligger.

Om de plaats van de staal-betonliggers te bepalen is de belasting uit de staalbetonliggers berekend, welke door de omcirkelde vloerligger naar de vakwerkliggers is afgedragen. Met behulp van de mechanica is daarna de plaats bepaald van de staal-betonliggers, zodat de vloerligger juist voldoet aan de eisen voor de UGT en de BGT.

De belastingen per m^2 op de traverse vloer bedragen:

$$P_{Gk} = 3,50 \text{ kN/m}^2.$$

$$P_{Qk} = 5,00 \text{ kN/m}^2 ; \psi_0 = 0,6$$

Voor de UGT geldt:

$$6.10.a: E_d = 1,5 * G_k + 1,65 * \psi_{0,1} * Q_{k,1}$$

$$\rightarrow P_{Ed} = 1,5 * 3,50 + 1,65 * 0,6 * 5,00 = 10,20 \text{ kN/m}^2.$$

$$6.10.b: E_d = 1,35 * G_k + 1,65 * Q_{k,1}$$

$$\rightarrow q_{Ed} = 1,35 * 3,50 + 1,65 * 5,00 = 12,98 \text{ kN/m}^2.$$

Voor de BGT geldt:

$$6.14: E_k = 1,0 * G_k + 1,65 * Q_{k,1}$$

$$\rightarrow P_{Ed} = 1,0 * 3,50 + 1,65 * 5,00 = 8,50 \text{ kN/m}^2.$$

De belastingen op de vloerligger worden:

$$F_{Ed} = \frac{1}{2} * 12,98 * 3,1 * 3,8 = 76,5 \text{ kN}$$

$$F_{Ek} = \frac{1}{2} * 8,50 * 3,1 * 3,8 = 50,1 \text{ kN}$$

De oplegreacties zijn gelijk aan de grootte van de puntlast.

Het maximale buigende moment, uitgedrukt in L_0 , in de vloerligger wordt:

$$M_v = F_{Ed} * L_0 = 76,5 * L_0$$

$$M_v \leq M_{Rd} = 39,6 \text{ kNm} \rightarrow L_0 \leq M_{Rd} / F_{Ed} = 39,6 / 76,5 = 0,52 \text{ m}.$$

De doorbuiging kan berekend worden met het vergeet-me-nietje:

$$w = 2 * \frac{F_{Ek} * L_0 * (3 * L^2 - 4 * L_0^2)}{48 * E * I}$$

Deze formule is in een exelsheet, Tabel 3-1, geplaatst en daarna met is L_0 met stappen van 50 mm opgehoogd. Bij 400 mm is de toelaatbare doorbuiging van 15 mm overschreden. Derhalve is voor $L_0 = 350$ mm aangehouden.

Tabel 3-1: Berekening doorbuiging in het midden van de vloerligger bij een variabele L_0

| Berekening doorbuiging vloerligger bij variabele L_0 | | | | |
|--|------------------------|---------------------|-------------------|----|
| L= | 3800 | | mm | |
| I = | 1106 * 10 ⁴ | | mm ⁴ | |
| E = | 210 * 10 ³ | | N/mm ² | |
| F _{Ek} = | 50,1 | | kN | |
| L ₀ = | 250 | w _{eind} = | 9,7 | mm |
| | 300 | | 11,6 | mm |
| | 350 | | 13,5 | mm |
| | 400 | | 15,3 | mm |
| | 450 | | 17,2 | mm |
| | 500 | | 19,0 | mm |
| | 550 | | 20,8 | mm |
| | 600 | | 22,6 | mm |
| | 650 | | 24,3 | mm |
| | 700 | | 26,0 | mm |
| | 750 | | 27,7 | mm |
| | 800 | | 29,3 | mm |

Bij controle van de slankheid van de vloer is gebleken dat een vloerdikte van ca. 100 mm krap wordt. Hier zal door middel van een nauwkeurige doorbuigingsberekening een controle op plaats moeten vinden.

Berekening van de staalbetonligger

De vloerelementen bestaan uit een betondek van 100 mm beton en 2 spoorstaven die als staal-betonligger gaan fungeren.

Normaal gesproken heeft een plastische berekening voor de momentweerstand, voor staal-betonconstructies, de voorkeur. De meeste warmgewalste I-vormige profielen in de staalsoort S235 en S355 vallen in de doorsnedeklasse 1 en soms in 2, waarbij een plastische berekening van de momentweerstand is toegestaan.

Bij de spoorstaaf ligt dit duidelijk gevoeliger, omdat de breukrek slechts 10 % bedraagt. Een volplastische doorsnede ontstaat theoretisch bij een (oneindig) grote rek, dat is bij deze breukrek dus al helemaal niet mogelijk.

In onderstaande berekening is daarom gerekend met een elastische momentweerstand van de doorsnede.

De belastingen op de staalbeton ligger zijn:

$$q_{Gk} = 3,8/2 * 3,50 = 6,65 \text{ kN/m}^1.$$

$$q_{Qk} = 3,8/2 * 5,00 = 9,50 \text{ kN/m}^1.$$

$$6.10.a: q_{Ed} = 1,5 * 6,65 + 1,65 * 0,6 * 9,50 = 19,4 \text{ kN/m}^1.$$

$$6.10.b: q_{Ed} = 1,35 * 6,65 + 1,65 * 9,50 = 24,7 \text{ kN/m}^1.$$

$$6.14: q_{Ek} = 1,0 * 6,65 + 1,0 * 9,50 = 16,2 \text{ kN/m}^1.$$

$$M_{Ed} = 1/8 * 24,7 * 3,1^2 = 29,7 \text{ kNm}$$

$$w_{eind} = \frac{5 * q_{Ek} * L^4}{384 * E * I} = \frac{5 * 16,2 * 3100^4}{384 * 210 * 10^3 * 1106 * 10^4} = 8,4 \text{ mm} < 0,004 * 3100 = 12,4 \text{ mm}$$

Het blijkt dat de momentweerstand van de spoorstaaf op zichzelf al groot genoeg is om het buigende moment te weerstaan. Ook de doorbuiging voldoet aan de norm. Om kipinstabiliteit te voorkomen, een laag traagheidsmoment om de z-as, en vanwege het feit dat het element geprefabriceerd en vervoerd moet worden heeft een samenwerking tussen beton en de spoorstaaf de voorkeur.

In de berekening is uitgegaan van beton C20/25 met de volgende eigenschappen:

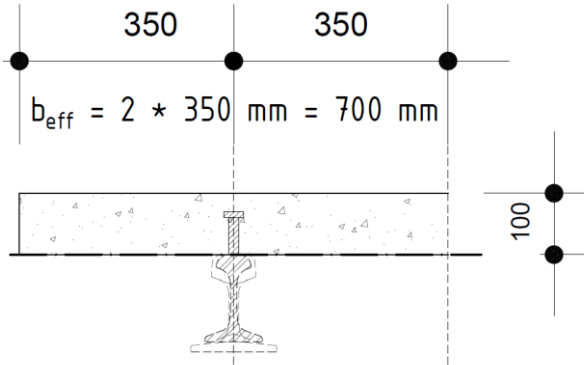
- $f_{cd} = 20/1,5 = 13,33 \text{ N/mm}^2$
- $\epsilon_{c3} = 1,75 * 10^{-3}$
- $\epsilon_{cu3} = 3,50 * 10^{-3}$
- $E_{cm} = 30 * 10^3 \text{ N/mm}^2$

Berekening staal-betonligger:

Effectieve breedte van de staal-betonligger $b_{i,max} = 3100 / 8 = 385$ mm.

Omdat het overstek slechts 350 mm bedraagt wordt:

$b_{eff} = 2 * 350 = 700$ mm. Zie doorsnede Figuur 3-5.



Figuur 3-5: Effectieve doorsnede staal-betonligger

Verhouding moduli, n_L , rekening houdend met kruip:

$$n_L = n_0 * (1 + \psi_L * \varphi_t) = 7,0 * (1 + 1,1 * 2,8) = 28,6$$

$$n_0 = E_a / E_{cm} = 210 * 10^3 / (30 * 10^3) = 7,0$$

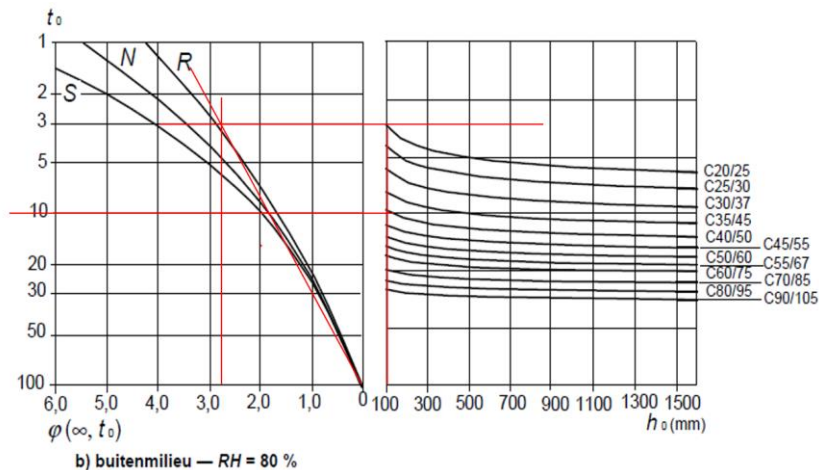
$$\psi_L = 1,1$$

φ_t =kruipcoëfficiënt, zie Figuur 3-6.

Voor de berekening van de kruipcoëfficiënt is gebruik gemaakt van de nomogram uit NEN-EN 1992-1-1 NB. De belasting wordt na 10 dagen aangebracht en er is gebruik gemaakt van cementklasse N, dus normale verhardingstijd.

$h_0 = 2 * A_c / u = 2 * 100 * 700 / (2 * 700 + 100) = 93,3$ mm. Voor de uitdrogingsoppervlakte is de bovenzijde, de onderzijde en 1 zijkant van de effectieve betondoorsnede aangehouden.

De kruipcoëfficiënt komt hierdoor uit op : $\varphi_t = 2,8$, zie Figuur 3-6.



Figuur 3-6: Bepaling kruipcoëfficiënt

De initiële breedte b_i wordt $b_i = b_{\text{eff}} / n_L = 700/28,6 = 24,5 \text{ mm}$

Het initiële zwaartepunt $z_{i,y}$ ligt op:

$$z_{i,y} = \frac{b_i \cdot h_c \cdot \left(h_a + \frac{h_c}{2}\right) + A_a \cdot z_{a,y}}{b_i \cdot h_c + A_c}$$

$$z_{i,y} = \frac{24,5 \cdot 100 \cdot \left(142 + \frac{100}{2}\right) + 3958 \cdot 63,7}{24,5 \cdot 100 + 3958} = 112,7 \text{ mm}$$

Dit betekent dat de neutrale lijn in de spoorstaaf ligt en dus het volledige betonoppervlak op druk belast wordt.

Het initiële traagheidsmoment $I_{y,i}$ wordt:

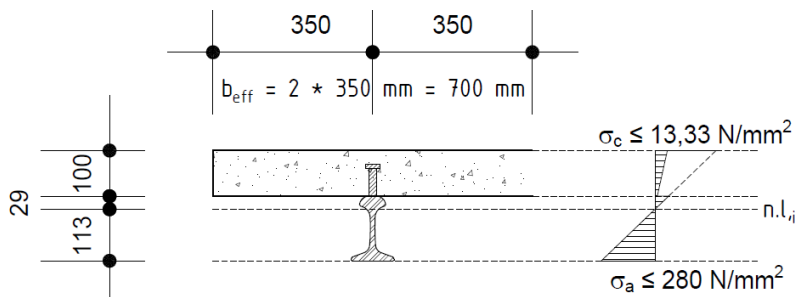
$$I_{y,i} = I_{y,a} + A_a(z_{y,i} - z_{y,a})^2 + I_{y,c} + A_c(z_{y,i} - z_{y,c})^2$$

$$I_{y,i} = 1106 \cdot 10^4 + 3958(112,7 - 63,7)^2 + 1/12 \cdot 700/28,6 \cdot 100^3 + 700/28,6 \cdot 100(112,7 - (142 \cdot 100/2))^2 = (1106 + 950 + 204 + 1534) \cdot 10^4 = 3794 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_o = I_{y,i} / 112,7 = 3794 \cdot 10^4 / 112,7 = 336,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_b = I_{y,i} / (142 + 100 - 112,7) = 3794 \cdot 10^4 / 129,3 = 293,4 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

De spanningsverdeling in de doorsnede van de staalbeton ligger is weergegeven in Figuur 3-7. Bij een elastische berekening mogen de vloeispanning en rekenwaarde van de drukspanning van het beton niet overschreden worden.



Figuur 3-7: Toelaatbare spanningsverdeling in de staal-betonligger

Stel dat de staalspanning σ_a maatgevend is, dan geldt $\sigma_a = 280 \text{ N/mm}^2$.

De spanning in het beton σ_c is nu:

$$\sigma_c = \sigma_a / n_L \cdot (h_t - z_{i,y}) / z_{i,y} = 280 / 28,6 \cdot (142 + 100 - 112,7) / 112,7 =$$

$$\sigma_c = 11,23 \text{ N/mm}^2 < f_{cd} = 13,33 \text{ N/mm}^2$$

Uitgangspunt dat de staalspanning maatgevend is, is juist.

Het toelaatbare buigende moment M_{Rd} kan nu berekend worden op basis van de staal- of de betonspanning.

Op basis van de staalspanning geldt:

$$M_{Rd} = \sigma_a \cdot I_{y,i} / z_{i,o} = 280 \cdot 3794 \cdot 10^4 / 112,7 = 94,3 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{Rd} = 94,3 \text{ kNm}$$

Op basis van de betonspanning geldt:

$$M_{Rd} = \sigma_c \cdot n_L \cdot I_{i,y} / z_{i,o} = 11,23 \cdot 28,6 \cdot 3794 \cdot 10^4 / (142 + 100 - 112,7) = 94,2 \cdot 10^6 \text{ Nmm.}$$

$$M_{Rd} = 94,2 \text{ kNm}$$

Conclusie:

Voor de staalbeton ligger geldt:

- $M_{Rd} = 94,2 \text{ kNm.}$
- De buigstijfheid $EI = 210 \cdot 10^3 \cdot 3974 \cdot 10^4 = 8345 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$

Toetsing UGT: $UC = M_{Ed} / M_{Rd} = 29,7 / 94,2 = 0,32 < 1,0$ 😊

Berekening aantal benodigde deuvels voor de samenwerking tussen beton en spoorstaaf:

Deuvels $\Phi 16$, C450,

(<https://www.stiflassen.nl/producten/lasstiften/sd-kopdeuvels/>)

$$D = 16 \text{ mm}$$

$$L = 50 \text{ mm}$$

$$A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2 = 201 \text{ mm}^2$$

$$f_u = 450 \text{ N/mm}^2$$

$$L/D = 50/16 = 3,125 > 3 \text{ en } < 4 \rightarrow \alpha = 0,2 \cdot (50/16 + 1) = 0,83$$

Voor deuvels in een vlakke plaat geldt:

Afschuiving stiftdeugel:

$$P_{Rd} = \frac{0,8 \cdot f_u \cdot A}{\gamma_V} = \frac{0,8 \cdot 450 \cdot 201}{1,25} = 57,9 \cdot 10^3 \text{ N} = 57,9 \text{ kN}$$

Voor stuk van het beton geldt:

$$P_{Rd} = \frac{0,29 \cdot \alpha \cdot D^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_V} = \frac{0,29 \cdot 0,83 \cdot 16^2 \cdot \sqrt{20 \cdot 30000}}{1,25} = 38,2 \cdot 10^3 \text{ N} = 38,2 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} \cdot q_{Ed} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 24,7 \cdot 3,1 = 38,3 \text{ kN}$$

$$\tau = \frac{V_{Ed} \cdot S}{b_{eff} \cdot n_L \cdot I_i} = \frac{38,3 \cdot 10^3 \cdot 5551 \cdot 10^3}{700 \cdot 28,6 \cdot 3794 \cdot 10^4} = 0,28 \text{ N/mm}^2$$

$$S = A_s \cdot z_s = 700 \cdot 100 \cdot \left(142 + \frac{100}{2} - 112,7\right) = 5551 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$V_L = \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot b_{eff} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 0,28 \cdot 700 \cdot 31003 = 303 \cdot 10^3 \text{ N} = 303 \text{ kN}$$

$$n = 303 / 38,2 = 8 \text{ deuvels.}$$

Verdeling deuvels: 1x150, 2x 300, 1x500, 1x600, 1x 500, 2x300, 1x 150 mm

Toetsing BGT:

Het element wordt op zijn kop gestort, waarna de spoorstaaf met opgelaste deuvels in de beton wordt aangebracht. Hierdoor is de samenwerking van het staal aan het beton al gerealiseerd en kan direct met de samengestelde doorsnede gerekend worden. Kruip is al verwerkt in de verhouding van de modulus van het beton. De berekende $EI = 8345 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$, mag gebruikt worden.

$$w_{\text{eind}} = \frac{5}{384} * \frac{(16,2) * 3100^4}{8345 * 10^9} = 2,3 \text{ mm} \leq w_{\text{max}} 0,004 * 3100 = 12,4 \text{ mm}$$

$$UC = w_{\text{eind}} / w_{\text{max}} = 2,3 / 12,4 = 0,19 \leq 1,0 \quad \text{☺}$$

3.3 Vakwerkligger.

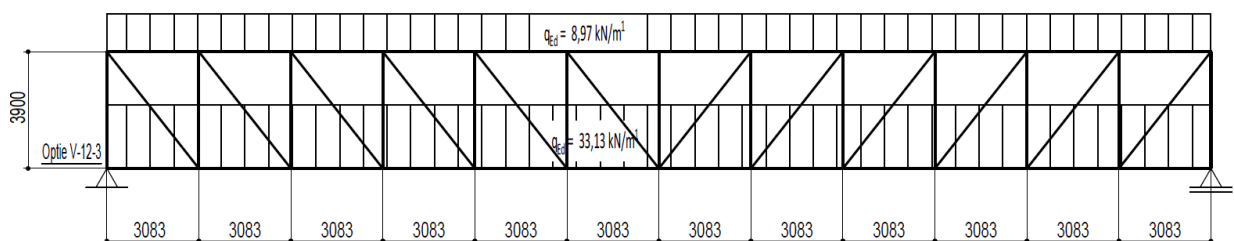
In paragraaf 2.3 zijn de vakwerkliggers gemodelleerd en in paragraaf 2.4 zijn de belastingen op de boven- en de onderrand voor de handberekening gemodelleerd als een gelijkmatig verdeelde belastingen. Ook zijn de permanente en veranderlijke belastingen ten gevolge van personen en sneeuw met behulp van vergelijkingen 6.10.a en 6.10.b uit NEN-EN 1990 tot rekenwaarden omgerekend.

Bovenrand: $q_{\text{Ed}} = 8,97 \text{ kN/m}^1$.

Onderrand: $q_{\text{Ed}} = 33,13 \text{ kN/m}^1$.

3.3.1. Constructieve beschouwing van de vakwerkligger

In Figuur 3-8 is het complete handberekeningsmodel weergegeven.



Figuur 3-8: Model vakwerkligger met rekenbelastingen

Omdat bij de handberekening de vakwerkligger in 1^e instantie gezien wordt als een volle-wandligger mogen de gelijkmatig verdeelde belastingen bij elkaar worden opgeteld.

Het fictieve moment in de vakwerkligger wordt hierdoor:

$$M_{\text{Ed}} = 1/8 * (8,97 + 33,13) * 37,0^2 = 7204 \text{ kNm}$$

$$V_{\text{Ed}} = 1/2 * (8,97 + 33,13) * 37,0 = 779 \text{ kN}$$

De maximale krachten in de boven- en de onderrand zijn:

$N_{Ed,OR} = M_{Ed} / h = 7204 / 3,9 = 1848$ kN. Dit is een normaaltrekkkracht.

$N_{Ed,BR} = M_{Ed} / h = 7204 / 3,9 = 1848$ kN. Dit is een normaaldrukkracht.

De maximale kracht in de diagonalen is:

$N_{Ed,D} = V_{Ed} * \sqrt{(3,12 + 3,92)} / 3,9 = 779 * 4,99 / 3,92 = 998$ kN. Dit is een normaaltrekkkracht.

De maximale kracht in de verticalen is:

$N_{Ed,V} = V_{Ed} = 779$ kN. Dit is een normaaldrukkracht.

Conclusie:

Voor de onderrand (belast op trek) is een dubbele spoorstaaf noodzakelijk.

$N_{Rdt} = 2 * 1108 = 2216$ kN > 1848 kN

Voor de bovenrand (belast op druk) is het de vraag of een dubbele spoorstaaf zal volstaan. Zodra de knikreductiefactor χ kleiner wordt dan $1848/2216 = 0,84$ zal de kniklengte gereduceerd of de dubbele spoorstaaf verzwwaard moeten worden. Dit is in paragraaf 3.3.1. verder uitgewerkt.

Voor de diagonalen (belast op trek) zal kritisch naar de gatverzwakking gekeken moeten worden. $N_{Ed,D} = 998$ kN $\approx N_{Rdt,t} = 997$ kN. Verder is de berekende kracht $N_{Ed,D} = 998$ kN groter dan de werkelijk optredende normaalkracht, omdat niet de volledige belasting via de diagonalen naar de portalen wordt afgevoerd.

Voor de verticalen (belast op druk), $N_{Ed,V} = 779$ kN, is het de vraag of een enkele spoorstaaf zal volstaan. Hierbij zal de knikreductiefactor χ groter moeten zijn dan: $779/1108 = 0,70$. Dit is onwaarschijnlijk omdat het traagheidsmoment om de zwakke as van de gedegradeerde doorsnede erg laag. Dit is verder uitgewerkt in paragraaf 3.3.2.

Inschatting van de doorbuiging van de vakwerkliggers:

Uit bovenstaande is duidelijk geworden dat voor de boven- en de onderrand zeker een dubbele spoorstaaf nodig is.

Om een indicatie van de doorbuiging te verkrijgen is een fictief traagheidsmoment I_f berekend. In verband met vervormingen in de knopen etc. is een reductie van 20% toegepast op de bepaling van I_f met behulp van de verschuivingsregel van Steiner.

$I_f = 0,8 * 2 * (2 * A * (h/2)^2) = 0,8 * A * h^2 = 0,8 * 3958 * 3900^2 = 48,16 * 10^9$ mm⁴.

$q_{Ek} = 5,35 + 1,06 + 12,93 + 9,50 = 28,84$.

$$w_{eind} = \frac{5}{384} * \frac{(28,84) * 37000^4}{210 * 10^3 * 48,16 * 10^9} = 69 \text{ mm}$$

De maximale doorbuiging die gehanteerd is bij het ontwerp van de traverse is 0,1 m op basis van $0,02 * 370000 = 74$ mm.

De onmiddellijk optredende doorbuiging ten gevolge van de permanente belasting bedraagt $(5,35 + 12,93) / 28,84 * 69 = 44$ mm.

Door een zeeg bij de montage aan brengen is doorbuiging helemaal geen probleem.

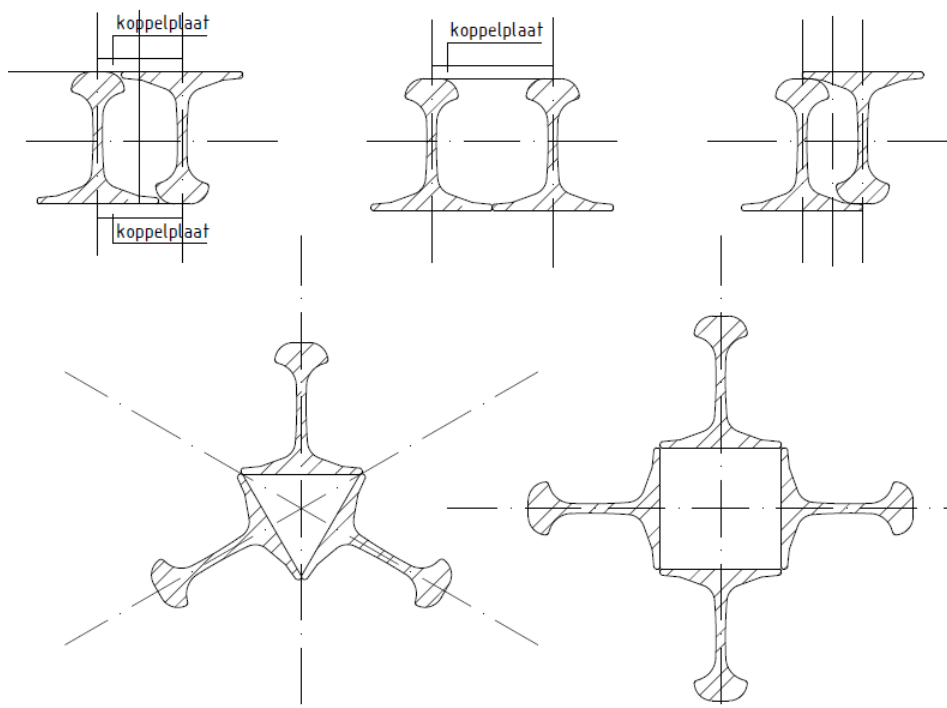
3.3.2. Toetsing bovenrand van de vakwerkligger op instabiliteit.

Zoals uit de conclusie van paragraaf 3.3.1 blijkt, zijn er 2 kritieke situaties met betrekking tot instabiliteitsproblemen met de vakwerkliggers.

Dit is het uitknikken van de bovenrand van de vakwerkligger en de verticale staven die de onderrand en de bovenrand verbinden.

Deze paragraaf beschouwt de stabiliteit van de bovenrand van de vakwerkligger. Hierbij is minimaal een staaldoorsnede nodig van 2 spoorstaven, dit is gelijk aan de onderrand. Door de druk kan de bovenrand uitknikken om de y- en de z-as. Hierbij zijn de doorsnede grootheden om de Y-as en om de z-as van een samengestelde profiel benodigd.

In 1^e instantie zijn een aantal combinaties van 2 of meerdere spoorstaven, zie Figuur 3-9, bekeken.

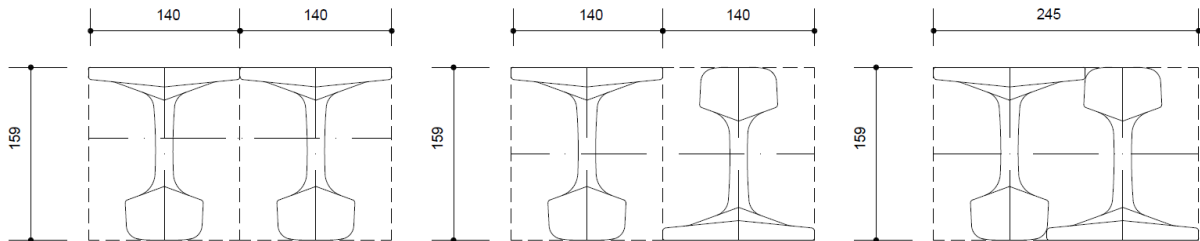


Figuur 3-9: Mogelijke samenstellingen van spoorstaven

Bij nader inzien bleek het niet zo eenvoudig te zijn als bovenstaand is weergegeven. Door verschillende slijtage en corrosie gradaties kan er een groot verschil in

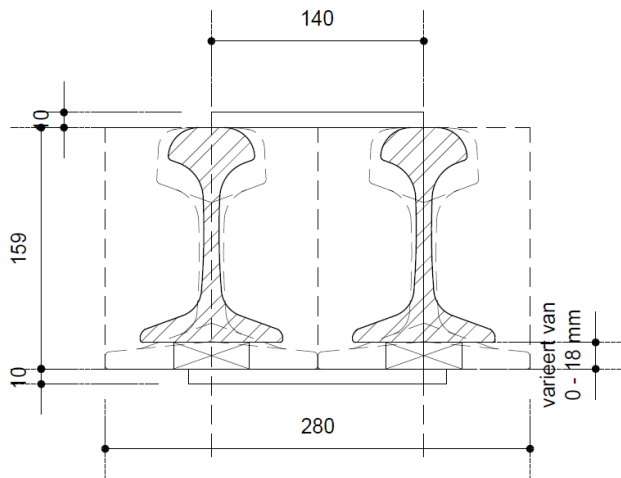
doorsneden van de profielen optreden. Uit oogpunt van uitvoering en maatvoering is een vaste maat voor de profieldoorsneden van wezenlijk belang.

De volgende stap is gezet om voor 3 combinaties van 2 spoorstaven zonder doorsnededegradatie de minimale omtrek te bepalen, zie Figuur 3-10.



Figuur 3-10: Minimale omtrek voor combinatie van 2 spoorstaven zonder gedegradeerde doorsnede.

Voor deze 3 combinaties is gekeken hoe de gebruikte spoorstaven het beste geplaatst en met koppelplaten aan elkaar gekoppeld kunnen worden. Hierbij is rekening gehouden met de constructieve samenwerking van de spoorstaven en de uitvoerbaarheid van het koppelen. Bij de uitvoerbaarheid is met name gekeken naar de lasvolgorde en de maatvastheid, waarbij zoveel mogelijk met vast plaatafmetingen gewerkt kan worden.



Figuur 3-11: Samengesteld profiel.

Het samengestelde profiel, Figuur 3-11, voldeed in eerste instantie het beste aan de bovenstaande ontwerpaspecten.

Als eerste is van dit samengestelde profiel de knikstabiliteit om de y-as, zonder rekening te houden met de schuifstijfheid van de koppelplaten berekend.

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_y^2} = \frac{\pi^2 * 210 * 10^3 * 2 * 1106 * 10^4}{3100^2} * 10^{-3} = 4771 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = 2 * A * f_{y,d} = 2 * 3958 * 280 * 10^{-3} = 2216 \text{ kN}$$

$$\lambda_y^- = \sqrt{\frac{N_{rd}}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{2216}{4771}} = 0,68$$

Knikkromme C $\rightarrow \alpha = 0,49$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\lambda_y^- - 0,2) + \lambda_y^{-2}]$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,68 - 0,2) + 0,68^2] = 0,85$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_y^{-2}}} = \frac{1}{0,85 + \sqrt{0,85^2 - 0,68^2}} = 0,74$$

$$N_{b,Rd,y} = \chi * N_{Rd} = 0,74 * 2216 = 1631 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd,y} = 1631 \text{ kN} < N_{Ed,BR} = 1848 \text{ kN}$$

Conclusie :

Met de gekozen doorsnede zal de bovenrand uitknikken om de y-as. Doordat de schuifstijfheid van de koppelplaten nog niet is meegenomen in de berekening zal de werkelijke kniklengte ook iets toenemen waardoor de situatie nog iets ongunstiger zal zijn.

Mogelijke verbeteringen zijn:

- De kniklengte verkorten
- De staaldoorsnede vergroten, dus extra staal voor de bovenrand
- Met de toegepaste staaldoorsnede, van 2 spoorstaven het traagheidsmoment vergroten, waardoor de kritische elastische kracht N_{cr} toeneemt en de reductiefactor χ ook toeneemt. Voor het vergroten van het traagheidsmoment zullen de spoorstaven in hoogte uit elkaar geschoven moeten worden.

Er is voor de laatste optie gekozen, zodat geen extra staal in de doorsnede nodig, behoudens enkele extra koppelplaten.

Om dit te realiseren is de doorsnede opnieuw beschouwd en is ontwerp, Figuur 3-12 ontstaan.

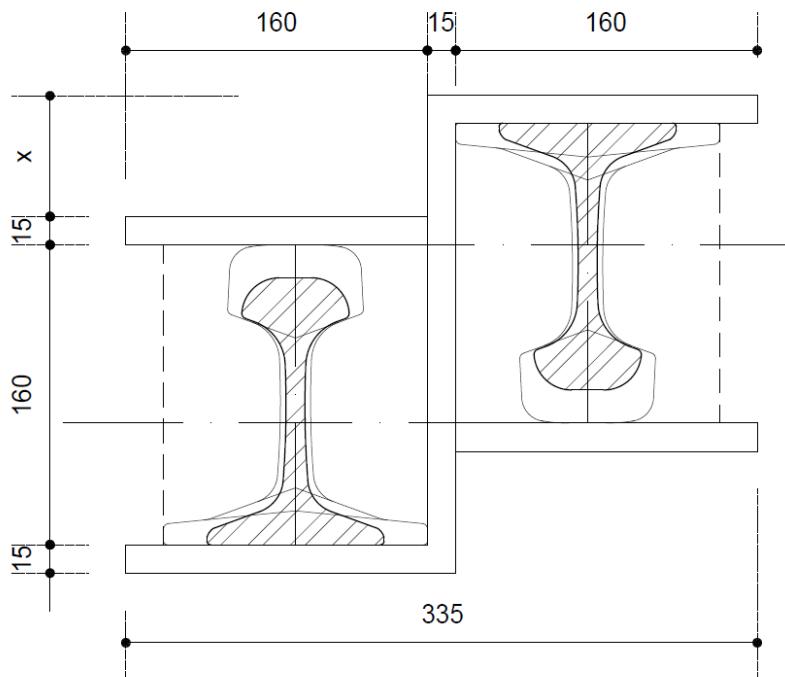
De maat x is een variabele maat. Met deze variabele kan de optimale hoogte vastgesteld worden, waarbij toetsing van knik om de y-as juist voldoet.

Er wordt een Z-profiel samengesteld, met een dikte geschat op 15 mm. De totale hoogte van het Z-staal wordt: $h = 190 + x$.

Bij een Z-profiel worden de gedegradeerde spoorstaven tegen horizontale platen op een vaste maat vastgelast. Om de koppen van de spoorstaven ook te fixeren worden er platen op de koppen gelast en tegen het lijf van het Z-profiel. De plaats van deze koppelplaten is dus variabel in verband met de variabele hoogte van de gekozen spoorstaaf.

De h.o.h. afstand a van de 2 spoorstaven ontstaat door de maximale breedte van een spoorstaaf, is 140 mm en de plaatdikte van 15 mm.

$$a = 140 + 15 = 155 \text{ mm.}$$



Figuur 3-12: Variable doorsnede bovenrand van de vakwerkligger

Met deze doorsnede met variabele x is een exelsheet gebouwd, waarin de volledige toetsing plaats vindt van een samengestelde staaf, inclusief de invloed van de schuifstijfheid van de koppelplaten en dus direct hiermee de variërende kritische elastische kniklengte van de bovenrand tussen de verticalen. Een screenshot is te vinden in Figuur 3-13.

De waarden die handmatig moeten worden ingevuld zijn rood. Bijvoorbeeld n , dit is het aantal velden waarin de staaf is opgedeeld. Hier is $n = 4$ (rood ingevuld). Dit betekent dat de afstand van de koppel platen $a = L/4 = 3100 / 4 = 775$ mm (zwart = berekend met exel).

Dit werkblad is gekoppeld aan het werkblad waarmee de doorsnedegrootheden zijn berekend. Daarom zijn deze waarden in zwart weergegeven.

Op deze wijze is een waarde voor x ontstaan van 80 mm.

Hiermee wordt de toetsing voor knik om de y -as:

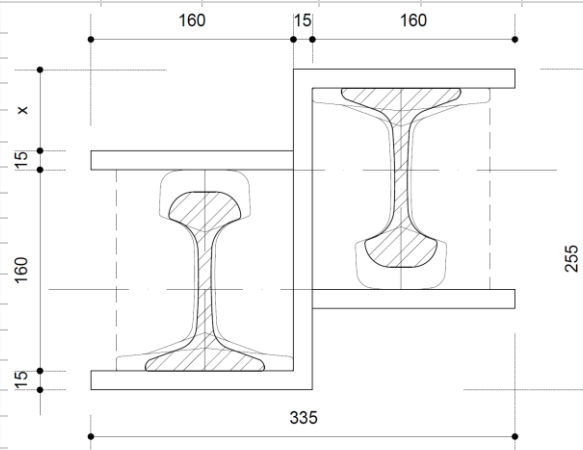
$$UC = N_{Ed} / N_{bRd,y} = 1848 \text{ kN} / 1862 = 0,99 < 1,00 \text{ 😊}$$

Voor knik om de z -as geldt:

$$UC = N_{Ed} / N_{bRd,y} = 1848 \text{ kN} / 1548 = 1,19 > 1,00 \text{ 😞}$$

Uit de unity check voor knik om de z-as komt een waarde groter dan 1. Dit betekent dat de bovenrand zal uitknikken om de z-as. Om dit te verhelpen kan dezelfde oplossing, als voor de y-as toegepast worden. Hiervoor moeten de spoorstaven horizontaal verder uit elkaar geplaatst worden. Echter hierdoor wordt de koppeling van de spoorstaven en de uitvoerbaarheid een stuk complexer. Door de stabiliteits-verbanden in het dakvlak, is een nagenoeg stijf vlak gecreëerd. Een koppeling tussen het dakvlak en bovenrand kan eenvoudig de kniklengte verkorten, waarmee de knikproblematiek eenvoudig kan worden verholpen.

| spoorstaaf | samengesteld bovenrand | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|-------------------|--------------------|--------|------------------|--------------------|--------|------------------|--|
| Grootheden | | | | | | | | | |
| A = | 3958 | mm ² | x = | 80 | mm | mm | | | |
| h = | 142 | mm | h _c = | 240 | mm | mm | | | |
| b = | 94 | mm | i _{1,y} = | 4550 | *10 ⁴ | mm ⁴ | | | |
| z _{v,o} = | 65,7 | mm | i _{1,z} = | 4093 | *10 ⁴ | mm ⁴ | | | |
| I _y = | 1106 | * 10 ⁴ | i _{0,y} = | 75,8 | mm | mm | | | |
| z _z = | 47,0 | mm | i _{0,z} = | 71,9 | mm | mm | | | |
| I _z = | 107 | mm ⁴ | λ _y = | 40,9 | <75 | μ _y = | 1,0 | | |
| E = | 210 | * 10 ³ | λ _z = | 43,1 | <75 | μ _z = | 1,0 | | |
| f _y = | 280 | N/mm ² | S _{v,y} = | 8928,0 | *10 ⁴ | S _{v,y} ≤ | 7634,6 | *10 ⁴ | |
| N _{Rd} = | 2216 | kN | S _{v,z} = | 8119,4 | *10 ⁴ | S _{v,z} ≤ | 738,9 | *10 ⁴ | |
| knikstabiliteit y-as | | | | | | | | | |
| L _y = | 3100 | mm | n = | 4 | n ≥ 3 | | | | |
| L _{cr,y} = | 3293 | mm | a = | 775 | | | | | |
| instab. kromme | c | | h _p = | 250 | mm | | | | |
| N _{cr,y} = | 8695 | kN | t _p = | 15 | mm | | | | |
| λ _{r,y} = | 0,50 | | h ₀ = | 108,7 | | | | | |
| α = | 0,49 | | | | | | | | |
| Φ = | 0,70 | | | | | | | | |
| χ = | 0,84 | | | | | | | | |
| N _{brd,y} = | 1862 | kN | | | | | | | |
| knikstabiliteit z-as | | | | | | | | | |
| L _z = | 3100 | mm | | | | | | | |
| L _{cr,z} = | 4593 | mm | | | | | | | |
| instab. kromme | c | | | | | | | | |
| N _{cr,z} = | 4022 | kN | | | | | | | |
| λ _{r,z} = | 0,74 | | | | | | | | |
| α = | 0,49 | | | | | | | | |
| Φ _z = | 0,91 | | | | | | | | |
| χ _z = | 0,70 | | | | | | | | |
| N _{brd,z} = | 1548 | kN | | | | | | | |
| N _{Ed} = | 1848 | kN | | | | | | | |



Figuur 3-13: Screenshot excel-werkblad voor toetsing samengestelde boverrand van de vakwerkligger.

3.3.3. Toetsing verticale staven van de vakwerkligger op instabiliteit.

Zoals in de conclusie van paragraaf 3.3.1 is aangegeven, zal de doorsnede van een enkele spoorstaaf onder de drukkracht $N_{Ed} = 779 \text{ kN}$ waarschijnlijk onvoldoende zijn in verband met de knikstabiliteit die om de z-as waarschijnlijk erg beperkt is.

Van het enkele profiel, is de kniklast om de z-as berekend.

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{L_z^2} = \frac{\pi^2 * 210 * 10^3 * 107 * 10^4}{3900^2} * 10^{-3} = 145 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = A * f_{y,d} = 3958 * 280 * 10^{-3} = 1108 \text{ kN}$$

$$\lambda_z^- = \sqrt{\frac{N_{rd}}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{1108}{145}} = 2,76$$

Knikkromme C $\rightarrow \alpha = 0,49$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\lambda_z^- - 0,2) + \lambda_z^{-2}]$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (2,76 - 0,2) + 2,76^2] = 4,95$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_z^{-2}}} = \frac{1}{4,95 + \sqrt{4,95^2 - 2,76^2}} = 0,11$$

$$N_{b,Rd,z} = \chi * N_{Rd} = 0,11 * 1108 = 122 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd,z} = 122 \text{ kN} \ll N_{Ed,BR} = 779 \text{ kN}$$

Conclusie :

Met een enkele spoorstaaf zal de verticale wandstaaf uitknikken om de z-as.

Het verschil is dermate groot dat het aanbrengen van knik-verkorters niet reëel is.

Er zal een dubbele spoorstaaf nodig zijn. Gekozen wordt voor de samenstelling zoals weergegeven in Figuur 3-11.

De toetsing om de Z-as wordt nu:

$$I_z = 2 * 107 * 10^4 + 2 * 3958 * 70^2 = 4092 * 10^4 \text{ mm}^4$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{L_z^2} = \frac{\pi^2 * 210 * 10^3 * 4092 * 10^4}{3900^2} * 10^{-3} = 5576 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = 2 * A * f_{y,d} = 3958 * 280 * 10^{-3} = 2216 \text{ kN}$$

$$\lambda_z^- = \sqrt{\frac{N_{rd}}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{2216}{5576}} = 0,63$$

Knikkromme C $\rightarrow \alpha = 0,49$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\lambda_z^- - 0,2) + \lambda_z^{-2}]$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,63 - 0,2) + 0,63^2] = 0,80$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_z^{-2}}} = \frac{1}{0,80 + \sqrt{0,80^2 - 0,63^2}} = 0,77$$

$$N_{b,Rd,z} = \chi * N_{Rd} = 0,77 * 2216 = 1700 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd,z} = 1700 \text{ kN} > N_{Ed,BR} = 779 \text{ kN} \quad \text{☺}$$

Uit een vergelijkbare berekening voor de toetsing om de y-as volgt dat:

$$N_{b,Rd,y} = 1388 \text{ kN} > N_{Ed,BR} = 779 \text{ kN} \quad \text{☺}$$

4. Conclusie

De waarden van de snedekrachten en doorbuigingen van de traverse uitgevoerd met spoorstaven zijn in Tabel 4-1 weergegeven.

De oplegreacties is 779 kN.

De drukkracht in de bovenrand is 1848 kN .

De trekkracht in de onderrand is 1848 kN .

Tabel 4-1: Snedekrachten, doorbuiging en gewicht traverse uitgevoerd in spoorstaven

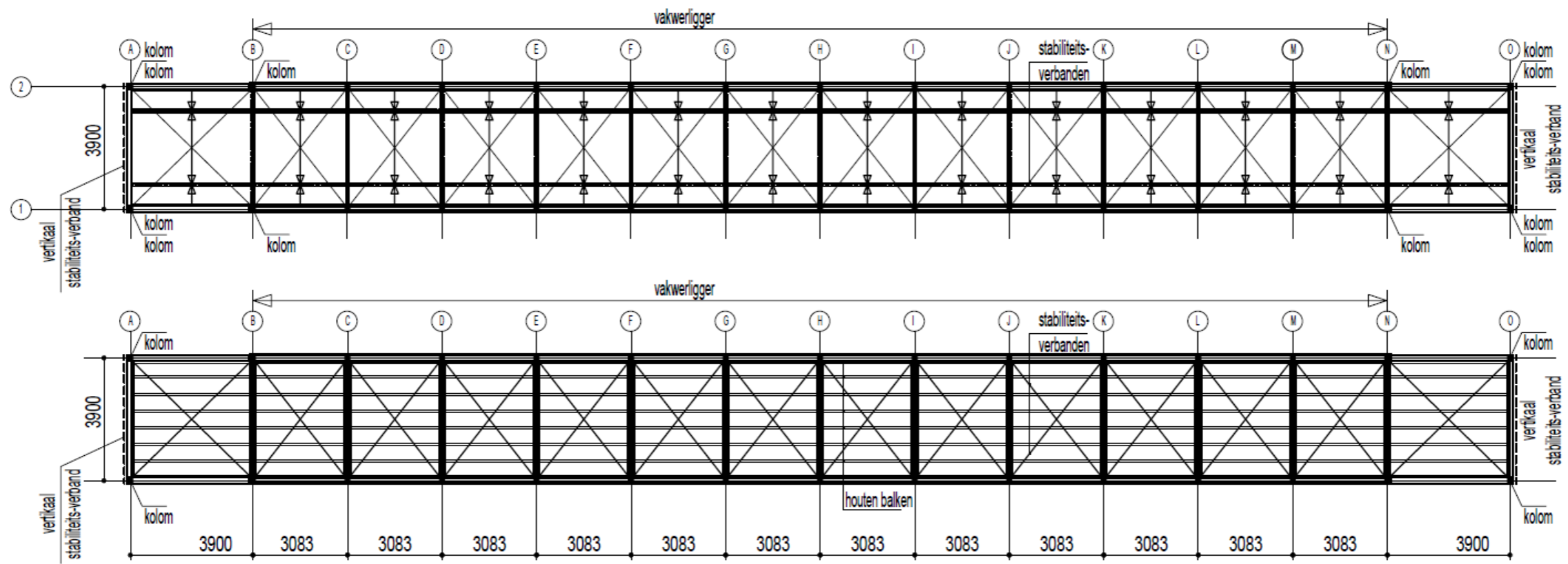
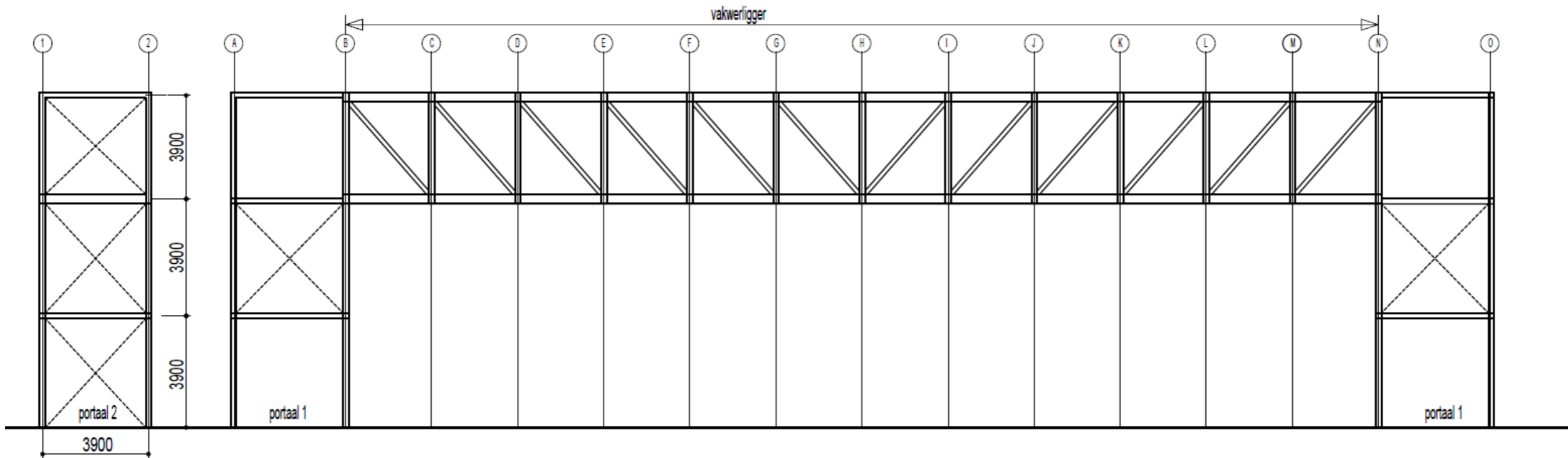
| | spoorstaven | | | | | | | |
|----------------------|-------------|--------|-------------|---------------|--------------|-------------------|-------------|------------|
| | aantal | lengte | profiel | gewicht/m | gewicht | M_{Ed} / N_{Ed} | UC | w_{eind} |
| | | m | | kg/m | kg | kNm / kN | | mm |
| Bovenrand | 24 | 3,08 | 2 x UIC54E1 | 45 | 6659 | 1848 kN | | |
| Onderrand | 24 | 3,08 | 2 x UIC54E1 | 45 | 6659 | 1848 kN | | |
| Verticaal | 26 | 3,90 | 2 x UIC54E1 | 45 | 9126 | 779 kN | | |
| Diagonaal | 24 | 4,98 | 1 x UIC54E1 | 45 | 5378 | 998 kN | | |
| dakligger | 13 | 3,80 | 1 x UIC54E1 | 45 | 2223 | 16,2 kNm | 0,41 | 7,5 |
| primaire vloerligger | 13 | 3,80 | 1 x UIC54E1 | 45 | 2223 | 26,8 kNm | 0,68 | 13,5 |
| staal-beton-ligger 2 | 24 | 3,08 | 1 x UIC54E1 | 45 | 3330 | 29,7 kNm | 0,32 | 2,3 |
| | | | | | 35599 | | | |
| | | | | Oplegreacties | 779 kN | | | |
| | | | | Doorbuiging | 69 mm | | | |

5. Bibliografie

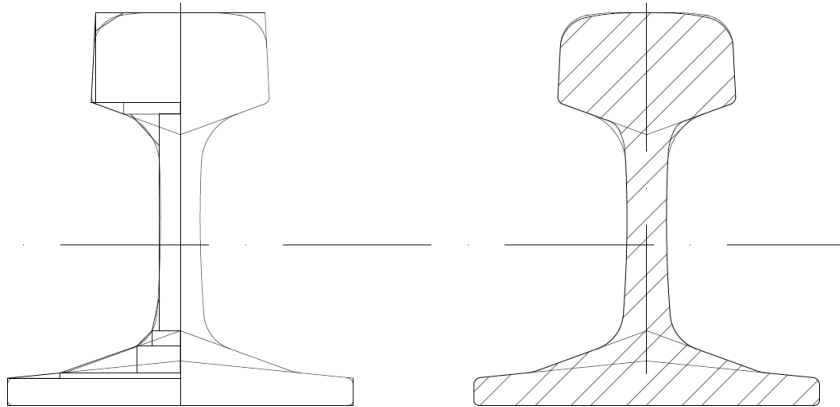
- Aan de Stegge BV. (2018). *www.adst.nl*.
- Arcadis. (2011). *Stationsgebied Driebergen-Zeist Fase 2B*.
- Arcadis. (2011). *Stationsgebied Driebergen-Zeist Planstudie fase 2B, 0756646080:C*. Amersfoort.
- Bouwen met staal. (2001). *Demonstratieproject IFD-bouwen in vernieuwende staalframebouw*. Bouwen met staal.
- DHV. (2010). *Dominatie-analyse scope 3*. Amersfoort.
- 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.
- 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. (2012). *Spoorstaafgebreken*.
- Prorail. (2015). *Instandhoudingsspecificaties*. Prorail.
- prorail. (2016). *Indentificatie en typering van spoorstaafdefecten*.
- Prorail Productbeheer. (2005). *Instandhoudingsdocument*.
- R.Blok. (2014). *Tabellen voor bouw- en waterbouwkunde 10e druk*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- RDW. (2012). *regelingen voertuigen*.
- 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=ZOfGapzIif0>
Treinreiziger.nl. (2009, november 17). *ProRail bouwt perron nieuwe stijl op station
Leiden Centraal*. Opgehaald van Treinreiziger.nl:
[https://www.treinreiziger.nl/prorail-bouwt-perron-nieuwe-stijl-op-station-
leiden-centraal/](https://www.treinreiziger.nl/prorail-bouwt-perron-nieuwe-stijl-op-station-leiden-centraal/)

Bijlage 1 Ontwerp traverse



Bijlage 2 Exelsheet doorsnedeberkening normdoorsnede

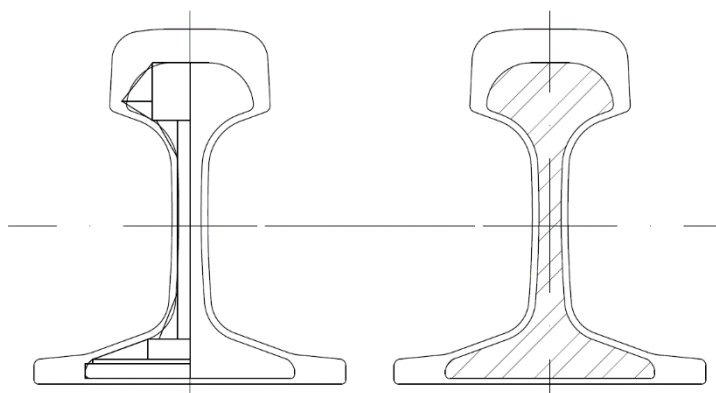


Figuur B2-1: Normdoorsnede UIC 54E1

Tabel B2-1: Exelberekening doorsnedegrootheden normprofiel UIC 54^E1

| Berekening doorsnede grootheden spoorstaaf | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|-----|----------------------------------|--------|------------------|----------------|--------|---|--|------------------|------------------|----------------|----------------------------------|---|--|
| Zonder corrosie en zonder slijtage | | | | | | | | | | | | | | | |
| | R/Do/Db | b | h | A | Z _{z,0} | Z _z | S | I _{y, eig} *10 ⁴ | I _{y, versch} *10 ⁴ | R/Dl/Dr | Z _{y,0} | Z _y | S | I _{z, eig} *10 ⁴ | I _{z, versch} *10 ⁴ |
| 1 | R | 70 | 11 | 770 | 0 | 5,5 | 4235 | 1 | 382 | R | 0 | 35 | 26950 | 31 | 94 |
| 2 | Do | -2 | 2 | -2 | 0 | 1 | -1 | 0 | -1 | DI | 70 | 69 | -139 | 0 | -1 |
| 3 | Db | -3 | 3 | -4,5 | 27 | 29 | -131 | 0 | -1 | DI | 70 | 69 | -311 | 0 | -2 |
| 4 | Do | 21 | 2 | 21 | 11 | 12 | 245 | 0 | 9 | Dr | 67 | 53 | 1113 | 0 | 6 |
| 5 | R | 49 | 2 | 98 | 11 | 12 | 1176 | 0 | 40 | r | 0 | 25 | 2401 | 2 | 6 |
| 6 | Do | 28 | 11 | 154 | 13 | 17 | 2567 | 0 | 54 | Dr | 49 | 30 | 4671 | 1 | 14 |
| 7 | R | 18 | 11 | 198 | 13 | 19 | 3663 | 0 | 65 | R | 0 | 9 | 1782 | 1 | 2 |
| 8 | Do | 6 | 6 | 18 | 24 | 26 | 468 | 0 | 4 | Dr | 18 | 14 | 252 | 0 | 0 |
| 9 | R | 11 | 6 | 66 | 24 | 27 | 1782 | 0 | 16 | R | 0 | 6 | 363 | 0 | 0 |
| 10 | Do | 3 | 14 | 21 | 30 | 35 | 728 | 0 | 4 | Dr | 11 | 9 | 189 | 0 | 0 |
| 11 | R | 8 | 88 | 704 | 30 | 74 | 52096 | 45 | 0 | R | 0 | 4 | 2816 | 0 | 1 |
| 12 | Db | 12 | 13 | 78 | 105 | 114 | 8866 | 0 | 11 | Dr | 20 | 12 | 936 | 0 | 1 |
| 13 | R | 23 | 5 | 115 | 118 | 121 | 13858 | 0 | 23 | R | 0 | 12 | 1323 | 1 | 2 |
| 14 | Db | 13 | 5 | 32,5 | 118 | 121 | 3943 | 0 | 7 | Dr | 36 | 27 | 888 | 0 | 2 |
| 15 | Do | 2 | 36 | 36 | 123 | 135 | 4860 | 0 | 13 | Dr | 36 | 35 | 1248 | 0 | 4 |
| 16 | R | 34 | 36 | 1224 | 123 | 141 | 172584 | 13 | 519 | R | 0 | 17 | 20808 | 12 | 35 |
| 17 | Db | -11 | 7 | -38,5 | 152 | 157 | -6032 | 0 | -25 | DL | 34 | 30 | -1168 | 0 | -4 |
| | | | | 3490,5 | | | 264907 | 60 | 1118 | | | | 64123 | 47 | 162 |
| totale profiel: | | | | | | | | | | | | | | | |
| A = | 6981 | | mm ² | | | | | | | A = | 6981 | | mm ² | | |
| I _y = | 2357 | | *10 ⁴ mm ⁴ | | | | | | | I _z = | 419 | | *10 ⁴ mm ⁴ | | |
| Zwaartepunt t.o.v. onderzijde: | | | | | | | | | | | | | | | |
| Z _y = | 75,9 | | mm | | | | | | | Z _z = | 70,0 | | mm | | |

Bijlage 3 Exelsheet doorsnedeberkening gedegradeerde doorsnede



Figuur B3-1: Gedegradeerde doorsnede UIC54E1

Tabel B3-1: Exelberekening doorsnede-grootheden Gedegradeerde UIC 54^E1.

| Berekening doorsnede grootheden spoorstaaf | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|----|----------------------------------|-------|------------------|----------------|----------|---|---|------------------|------------------|----------------|----------------------------------|---|---|
| Met corrosie en met slijtage | | | | | | | | | | | | | | | |
| | R/Do/Db | b | h | A | Z _{z,0} | Z _z | S | I _{y,veig} *10 ⁴ | I _{y,versch} *10 ⁴ | R/Dl/Dr | Z _{y,0} | Z _y | S | I _{z,veig} *10 ⁴ | I _{z,versch} *10 ⁴ |
| 1 | R | 47 | 7 | 329 | 0 | 3,5 | 1151,5 | 0 | 127 | R | 0 | 24 | 7732 | 6 | 18 |
| 2 | Do | -2 | 2 | -2 | 0 | 1 | -1 | 0 | -1 | DI | 65 | 64 | -129 | 0 | -1 |
| 3 | Db | -3 | 3 | -4,5 | 4 | 6 | -27 | 0 | -2 | DI | 65 | 64 | -288 | 0 | -2 |
| 4 | Do | 2 | 2 | 2 | 7 | 8 | 15 | 0 | 1 | Dr | 62 | 61 | 121 | 0 | 1 |
| 5 | R | 44 | 2 | 88 | 7 | 8 | 704 | 0 | 29 | R | 0 | 22 | 1936 | 1 | 4 |
| 6 | Do | 25 | 9 | 112,5 | 9 | 12 | 1350 | 0 | 32 | Dr | 44 | 27 | 3075 | 0 | 8 |
| 7 | R | 19 | 9 | 171 | 9 | 14 | 2309 | 0 | 47 | R | 0 | 10 | 1625 | 1 | 2 |
| 8 | Do | 8 | 21 | 84 | 18 | 25 | 2100 | 0 | 14 | Dr | 14 | 9 | 728 | 0 | 1 |
| 9 | R | 5 | 98 | 490 | 18 | 67 | 32830 | 39 | 0 | R | 0 | 3 | 1225 | 0 | 0 |
| 10 | Db | 10 | 17 | 85 | 99 | 110 | 9378 | 0 | 17 | Dr | 15 | 8 | 708 | 0 | 1 |
| 11 | Db | 14 | 9 | 63 | 116 | 122 | 7686 | 0 | 20 | Dr | 31 | 22 | 1365 | 0 | 3 |
| 12 | Do | 14 | 17 | 119 | 124 | 130 | 15430 | 0 | 49 | Dr | 31 | 22 | 2578 | 0 | 6 |
| 13 | R | 17 | 26 | 442 | 116 | 129 | 57018 | 2 | 177 | R | 0 | 9 | 3757 | 1 | 3 |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 1979 | | | 129943,7 | 43 | 511 | | | | 24433 | 10 | 44 |
| totale profiel: | | | | | | | | | | | | | | | |
| A = | 3958 | | mm ² | | | | | | | A = | 3958 | | mm ² | | |
| I _y = | 1106 | | *10 ⁴ mm ⁴ | | | | | | | I _z = | 107 | | *10 ⁴ mm ⁴ | | |
| Zwaartepunt t.o.v. onderzijde: | | | | | | | | | | | | | | | |
| Z _y = | 65,7 | | mm | | | | | | | Z _z = | 65,0 | | mm | | |