


Ketenanalyse van spoorstaven

Opgesteld door SGS Search Consultancy



Rob Gerritsen
Dieren, 13 dec '22

Colofon Rapportage

Onderzoeksgegevens

Naam onderzoek Ketenanalyse spoorstaven
 Project
 Soort onderzoek Levenscyclusanalyse (LCA)
 Projectnummer 26.20.00698
 Looptijd project Maart 2020 – November 2021

Opdrachtgever

Organisatie ProRail
 Contactpersoon Rob Gerittsen
 Adres Tulpenburgh 2.63, Moreelsepark 2
 Postcode en plaats 3511 EP Utrecht
 Telefoonnummer 06-47942681
 E-mail rob.gerritsen@prorail.nl

Uitvoerende organisatie

Organisatie SGS Search Consultancy
 Contactpersoon Branco Schipper
 Adres Petroleumhavenweg 8
 Postcode en plaats 1041 AC Amsterdam
 Telefoonnummer 06-22777279
 E-mail branco.schipper@sgs.com

Versie beheer

| Num | Datum | Versie | Auteur | Controle |
|-----|------------|--|-----------------|----------|
| 1 | 22-03-2021 | Initieel | Branco Schipper | |
| 2 | 22-07-2021 | Herziening onderhoud en spoorstaaf profiel | Branco Schipper | |
| 3 | 22-11-2021 | Definitief | Branco Schipper | |

INHOUD

| | |
|--|-----------|
| Inhoud | 2 |
| 1. Inleiding | 3 |
| 1.1. <i>Algemeen</i> | 3 |
| 1.2. <i>Doelstelling van het onderzoek</i> | 3 |
| 1.3. <i>Reikwijdte van de studie</i> | 3 |
| 2. Levenscyclus-inventarisatie | 5 |
| 2.1. <i>Dataverzamelingsprocedure</i> | 5 |
| 2.2. <i>A1-A3 Grondstoffen en productie halffabricaten</i> | 5 |
| 2.3. <i>A4 Transport naar Werk</i> | 7 |
| 2.4. <i>A5 Constructie</i> | 8 |
| 2.5. <i>B1-B7 Onderhoud</i> | 8 |
| 2.6. <i>C1 Sloop</i> | 10 |
| 2.7. <i>C2 Transport naar verwerking</i> | 11 |
| 2.8. <i>C3 en C4 Afvalverwerking</i> | 11 |
| 2.9. <i>D Terugwinning</i> | 11 |
| 3. Levenscyclus-effectbeoordeling | 13 |
| 3.1. <i>Procedures, berekeningen en resultaten</i> | 13 |
| 3.2. <i>Milieueffect wegen</i> | 13 |
| 4. Levenscyclus-interpretatie | 15 |
| 4.1. <i>Aanpak interpretatie</i> | 15 |
| 4.2. <i>Zwaartepuntanalyse</i> | 15 |
| 4.3. <i>Gevoeligheidsanalyse / verbeter mogelijkheden</i> | 17 |
| 5. Conclusie | 19 |
| 6. Bronvermelding | 20 |
| BIJLAGE A Weging & Milieuprofielen | 21 |

1. INLEIDING

1.1. Algemeen

Deze levenscyclusanalyse (LCA) c.q. ketenanalyse is opgesteld in opdracht van ProRail. Het betreft een LCA-berekening van spoorstaven. Dit rapport geeft een onderbouwing voor de milieukostenindicator (MKI) waarde en CO₂-emissies gerelateerd aan de levenscyclus van de spoorstaven.

Dit rapport voldoet aan de eisen gesteld in ISO 14040 [1], ISO 14044¹ [2], NEN-EN 15804 [3] en de Bepalingsmethode Milieuprestatie gebouwen en GWW werken versie 3.0, januari 2019, inclusief wijzigingsbladen d.d. juli 2019 en januari 2020 [3].

De LCA-berekening is opgesteld met SimaPro v9.1 software. De toegepaste referentiedatabases zijn:

- Nationale Milieudatabase versie 3.2 [5];
- Ecoinvent database 3.5 [6]

1.2. Doelstelling van het onderzoek

Uit de dominantieanalyse door ProRail blijkt dat spoorstaven een van de grootste bijdrage leveren aan de totale CO₂ uitstoot van de railinfrastructuur. ProRail heeft 10 jaar geleden een CO₂ ketenanalyse laten uitvoeren. Inmiddels zijn er veel ontwikkelingen geweest, zijn er aanpassingen geweest in de vervaardiging van spoorstaven en zijn er ervaringen opgedaan met het beheersen van de levenscyclus van een spoorstaaf. Daarnaast zal het hergebruik van spoor steeds meer een rol gaan spelen. Vanwege deze reden is besloten om een nieuwe ketenanalyse gemaakt dient te worden, om vervolg stappen te kunnen zetten in het reduceren van de CO₂ uitstoot. Tevens zal een MKI-score worden berekend.

1.3. Reikwijdte van de studie

Functionele eenheid / referentie eenheid

Spoorstaven worden in verschillende projectlengtes aangelegd en vervangen. Dat heeft consequenties voor productie en aanlegwijze. Om te kunnen vaststellen of dit verschil ook effect heeft op de MKI en CO₂-emissies zijn drie scenario's uitgesplitst.

- Vervangen van spoorstaaf met een levensduur van 42 jaar in project van 1000m
- Vervangen van spoorstaaf met een levensduur van 42 jaar in project van 100m Plaatsen van een passtuk (6-9m) met een levensduur van 10 jaar

Het uitgangspunt voor de spoorstaaf is type 54E1, welke type het meest wordt toegepast. Bij een UIC-baanvakklasse 1, 2 en 3, is de levensduur van een voegloze spoorstaaf 42 jaar. Deze baanvakklassen dekken het gros van het Nederlandse spoor. Als er nog voegenspoor aanwezig is, zal dat niet in de genoemde baanvakklasse zijn. De vastgestelde levensduur van 42 jaar is ook voor genoemde baanvakklassen een gemiddelde. Spoorstaven in bochten zullen bijvoorbeeld veel sneller slijten, en zijn binnen 5-10 jaar aan vervanging toe, terwijl rechte stukken wel 60-100 jaar mee kunnen.

Een passtuk wordt geplaatst om een defect te verhelpen en zal tegelijkertijd met het omliggende spoor worden vervangen zodra dat aan vervanging toe is. Defecten kunnen door allerlei redenen ontstaan, en kunnen dus in principe ook voorkomen bij nieuwe spoorstaven. Echter dat is wel onwaarschijnlijk. Defecten die niet te verhelpen zijn door slijpen zullen pas later gedurende de levensduur van een spoorstaaf optreden. Volgens een schatting van een expert bij ProRail zullen de passtukken geplaatst worden bij spoorstaven met gemiddeld nog een kwart van hun levensduur resterend. Het uitgangspunt voor de levensduur van passtukken is daarom een kwart van reguliere spoorstaven: 10 jaar (naar beneden afgerond).

¹ Als uitzondering op de bepalingen in ISO14044 wordt weging van de milieu-impact resultaten naar een "single point" (weging) toegepast.

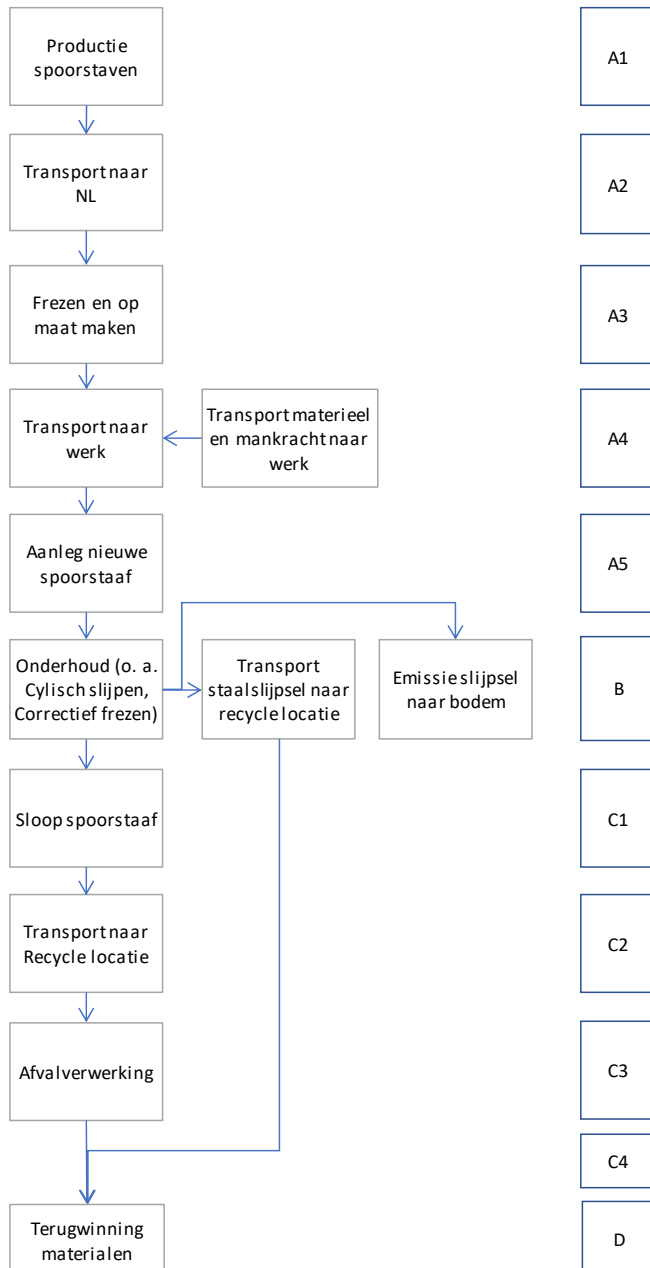
NEN-EN 15804 fases

In de volgende tabel staan de NEN-EN 15804 fases die van toepassing zijn voor deze LCA².

| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|---|
| ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Systeemgrenzen

De procesboom omvat de belangrijkste kwalitatieve processen, die nodig zijn voor de producteendheid of om de functie uit de functionele eenheid te kunnen vervullen. Alle systeem inputs en outputs en kwantitatieve gegevens worden onder het hoofdstuk levenscyclusinventarisatie nader uiteengezet. De procesboom is onderverdeeld in procesfasen conform NEN-EN 15804 [3]. Zie Figuur 1.



Figuur 1 Procesboom spoorstaven

² ✓ = Gegevens verzameling en effectbeoordeling zijn onderwerp van deze studie
 ND= Not declared

Cut-off criteria voor inputs en outputs

In deze studie zijn alle inputs en outputs waarvoor data beschikbaar is meegenomen in de berekening.

Er zijn geen vermoedens dat er relevante inputs of outputs zijn weggelaten. Hierbij is de definitie van relevante input van par. 2.6.3.5. van de bepalingsmethode aangehouden. Daarnaast zijn de criteria voor in- en output aangehouden conform de bepalingsmethode, paragraaf 2.6.3.4. en de NEN-EN 15804, paragraaf 6.2.

In de gebruikte achtergrondprocessen zijn te minste de volgende ingrepen meegenomen in de analyse:

- Emissies naar de lucht bij het gebruik van thermische energie van CO₂, CO, NO_x (NO en NO₂), SO₂, C_xH_y en fijnstof (PM10 deeltjes < 10µm);
- Emissies naar water van CZV, BZV, P-totaal, N-totaal en vaste stof (PM10: deeltjes < 10µm);
- Emissies naar bodem van PAK en zware metalen

2. LEVENSCYCLUS-INVENTARISATIE

2.1. Dataverzamelingsprocedure

De gegevens voor deze LCA c.q. ketenanalyse zijn verzameld m.b.v. Martijn van Noort (ProRail), Matthijs Doesberg (ProRail), Jeroen Smulders (ProRail), Hans van Houwelingen (RailPro) en Wouter Lampe (RailPro). Er is tevens gebruik gemaakt van gegevens uit de voorgaande ketenanalyse (DHV) en een categorie 3 LCA voor spoorstaven opgesteld door SGS Search.

Voor het maken van de LCA is voor de achtergrondprocessen gebruik gemaakt van de genoemde referentiedatabases. In de volgende paragrafen worden de kwantiteit, kwaliteit, allocatie en referentieprocessen van de verschillende materialen, emissies en processen behandeld voor modules A1 t/m D.

2.2. A1-A3 Grondstoffen en productie halffabricaten

De productie van spoorstaaf is gebaseerd op een op maat gemaakt staalprofiel. Spoorstaafstaal betreft een warmgewalste stalen legering met mangaan. Doorgaans wordt een spoorstaaf geproduceerd in een hoogoven. Met deze twee gegevens lijkt het meest geschikte ecoinvent profiel de productie van laag-gelegeerd staal in een hoogoven. Echter dit profiel gaat uit van een staal legering met 2% chroom, 1% mangaan en 1% nikkel. Alhoewel de verschillen met de legering van spoorstaven klein zijn (≤0,15% Cr, 1,3-1,7% Mn), heeft toevoeging van chroom een aanzienlijk groot effect op de milieuimpact. Bovendien wordt voor chroom een bovenste limiet aangegeven, en wordt dit niet opzettelijk toegevoegd. Aanwezig chroom in spoorstaven zal uit schroot afkomstig zijn. Om beter aan te sluiten op de daadwerkelijke legering is het ecoinvent profiel daarnaar aangepast. Volgens EN13674-1 dient staalsoort R260Mn de volgende legeringselementen te bevatten:

- C: 0,55 – 0,75 %
- Si: 0,15 – 0,6%
- Mn: 1,3 – 1,7%

Aanwezigheid van andere elementen zijn vervuiling afkomstig uit schroot, hiervoor zijn maximum waarden opgenomen in de norm in de orde grote van maximaal 0,03% (m.u.v. van Chroom, waarvoor een bovenste limiet van 0,15% bestaat). In het aangepaste ecoinvent kan de hoeveelheid koolstof en silicium niet worden beïnvloed met de ingrediënten, maar hoeveelheden van mangaan kan wel aangepast worden. Als worst-case benadering is een hoeveelheden ferromangaan gekozen zodat hun maximale toegestane hoeveelheid aanwezig is in de spoorstaaf (1,7% mangaan). Ingrediënten die zijn aangepast vergeleken met het originele ecoinventproces zijn weergegeven in Tabel 1. Niet genoemde bestanddelen in het milieuprofiel zijn gelijk gelaten.

In voorgaande LCAs en ketenanalyses is nog gerekend met staalprofielen met grotere hoeveelheden legeringselementen. De aanpak die hier is genomen is accurater, maar door dit verleden kunnen wel grote verschillen in resultaat ontstaan, ondanks dat het daadwerkelijke productie proces van

spoorstaven niet is veranderd (kleine verbeteringen qua energiestatistiek daargelaten).

Spoorstaven worden onder andere in Oostenrijk en Noord-Spanje geproduceerd. Voor het transport naar Nederland is uitgegaan van een gemiddelde transport afstand. De route van Oostenrijk naar Nederland bedraagt ca. 1200km transport per trein. De spoorstaven uit Spanje worden vanaf Bilbao per schip naar Hamburg (2250km) vervoerd en gaan vervolgens per trein naar Nederland (ca. 550km). Het gemiddelde transport is dan 875km per trein en 1125 km per schip.. Spoorstaven worden in lengtes van 120m aangeleverd.

Bij RailPro wordt de bovenste laag (ca. 0,07mm) van de spoorstaven gefreesd om de levensduur te verlengen. Vervolgens worden de spoorstaven op maat gemaakt d.m.v. afbrandstuiklassen voor lengtes langer dan 120m, ofwel gezaagd in kleinere lengtes. De maximale lengte die RailPro kan leveren is 360m.

De freesmachine verbruikt ca. 25-30 kW en kan 6 tot 8 meter spoorstaaf per minuut frezen. Uitgaande van een worst-case scenario (30 kW; 6 meter/min of 360 m/uur), is het verbruik $30/360 = 0,08333$ kWh per meter spoorstaaf.

Afbrandstuiklassen en zaagsneden werden als niet significant beschouwd door RailPro, maar zijn bij grove benadering wel in beschouwing genomen. Één zaagsnede zou slechts een fractie van een kilowattuur verbruik; het gekozen uitgangspunt is 0,1 kWh. Het energieverbruik van een afbrandstuiklas is benaderd d.m.v. een schatting van de gehanteerde stroomsterkte (800 A) en spanning (100 V) ($800 \text{ A} \times 100 \text{ V} = 80 \text{ kW}$). Het gehele proces om een afbrandstuiklas te maken kost ongeveer 1 minuut. Slechts een deel van die tijd wordt daadwerkelijk stroom verbruikt. Het uitgangspunt is dat er slechts 30 seconden sprake is genoemde stroomsterkte en spanning. $30 \text{ s} / 3600 \text{ s/uur} \times 80 \text{ kW} = 0,6667 \text{ kWh per las}$.

Het uitgangspunt voor het scenario van 1000m spoorstaaf is dat deze in lengtes van 2 maal 360m en één van 280m geleverd worden. Voor deze lengtes worden 3 spoorstaven van 120m aan elkaar gelast, en één exemplaar wordt ingekort. Totaal 6 lassen en één zaagsnede.

Voor spoorstaven met projectlengte van 100m is het uitgangspunt dat deze bij een spoorovergang geleverd worden per vrachtwagen, om vervolgens m.b.v. een krol een kleine afstand naar juiste plek gereden worden. Per vrachtwagen kan men spoorstaaf lengtes tot 36 meter transporteren. Echter bij die lengte is speciaal vervoer nodig. Tot 24 meter spoorstaven kan men met reguliere vrachtwagens rijden. In dit scenario gaan we uit van 5 maal 20m spoorstaven, waarvoor 5 zaagsneden nodig zijn.

Voor het scenario voor het passtuk van 6 meter is simpelweg één zaagsnede nodig. Het passtuk wordt in het scenario per trein geleverd.

Tabel 1 Aangepast milieuprofiel voor spoorstaafstaal productie (o.b.v. Steel, low-alloyed {RER}) per kg productie

| Materiaal / element | Milieuprofiel | Originele hoeveelheid | Hoeveelheid nieuw profiel | Eenheid | Uitgangspunten |
|---------------------|--|-----------------------|---------------------------|---------|--|
| Chroom | Ferrochromium, high-carbon, 68% Cr {GLO} market for Cut-off, U | 0,032853 | 0 | kg | Er wordt geen chroom toegevoegd. Wanneer wel aanwezig is, betreft het een vervuiling |
| Mangaan | Ferromanganeese, high-coal, 74.5% Mn {GLO} market for Cut-off, U | 0,015278 | 0,02601660064 | kg | Hoeveelheid afgestemd op 1,7% Mn |
| Nikkel | Ferronickel, 25% Ni {GLO} market for Cut-off, U | 0,045 | 0 | kg | Er wordt geen nikkel toegevoegd. Wanneer wel aanwezig is, betreft het een vervuiling |
| Schroot | Iron scrap, sorted, pressed {GLO} market for Cut-off, U | 0,12501 | 0,12501 | kg | Hoeveelheid schroot onveranderd gelaten |
| Ruw ijzer | Pig iron {GLO} market for Cut-off, U | 0,9 | 0,96711469936 | kg | Meer ruw ijzer nodig door in mindering brengen van legeringselementen |



Tabel 2 Productie spoorstaaf

| Materiaal | 1km spoor | 100m spoor | Passtuk (6m) | Eenheid | Referentieproces |
|---|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------|--|
| Productie staal spoorstaaf | 1000 m * 54,77 kg | 100 m * 54,77 kg | 6 m * 54,77 kg | kg | Spoorstaven staal 54E1 R260Mn, met 1,7% Mn (o.b.v. Steel, low-alloyed {RER}) steel production, converter, low-alloyed Cut-off, U) (Zie Tabel 1 |
| Walsen spoorstaaf (onderdeel van productie) | 1000 m * 54,77 kg | 100 m * 54,77 kg | 6 m * 54,77 kg | kg | Hot rolling, steel {RER} processing Cut-off, U |
| Treintransport naar Nederland | 47924 | 4792,4 | 287,54 | tkm | 0133-tra&Transport, vrachttrein (o.b.v. Transport, freight train {Europe without Switzerland}) market for Cut-off, U) |
| Transport per schip naar Nederland | 61616 | 6161,6 | 369,70 | tkm | XXXX Transport, vrachtschip, zee (o.b.v. Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}) market for Cut-off, U) |
| Frezen spoorstaaf (RailPro) | 1000 * 0,08333 = 83,33 | 100 * 0,08333 = 8,33 | 6 * 0,08333 = 0,5 | kWh | 0124-pro&1 kWh, uit stopcontact (o.b.v. Electricity, low voltage {NL}) market for Cut-off, U) |
| Afbrandstuiklassen | 6 * 0,6667 = 4 | - | - | kWh | 0124-pro&1 kWh, uit stopcontact (o.b.v. Electricity, low voltage {NL}) market for Cut-off, U) |
| Op lengte zagen | 0,1 | 5 * 0,1 = 0,5 | 0,1 | kWh | 0124-pro&1 kWh, uit stopcontact (o.b.v. Electricity, low voltage {NL}) market for Cut-off, U) |

2.3. A4 Transport naar Werk

A4 betreft in een LCA transport van spoorstaven, maar in dit geval ook transport van mankracht en machinerie welke nodig is bij het aanleggen van de spoorstaven. Op basis van uitvoerverslagen van spoorvernieuwing projecten en data uit voorgaande ketenanalyse is een schatting gemaakt hoeveel mankracht en machines nodig zijn. Dat is weergegeven in Tabel 3. Transport van en naar het werk is opgenomen, daarbij gaan we uit van een forfaitaire afstand van 150 km (één richting). Voor transport van personeel wordt uitgegaan van 100 km transport één richting. Werkploegen zullen deels met eigen auto naar bouwlocatie komen, maar naar verwachting ook deels met gezamenlijk transport. We gaan uit van gemiddeld 2 personen per wagen. Transport staven wegen ca. 54,3 kg/m nadat ze zijn gefreesd door RailPro.

Tabel 3 Inzet van materieel en mankracht per projectgrote

| | 1km spoor | 100m spoor | Passtuk (6m) |
|-----------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Krol | 2 krollen | 1 krol | 1 krol |
| Railauto | 3 wagens | 2 wagens | 1 wagens |
| Mankracht | 12 wagens (gemiddeld 2 man per wagen) | 6 wagens (gemiddeld 2 man per wagen) | 2 wagens (gemiddeld 2 man per wagen) |

Tabel 4 Transport spoorstaven naar werk

| Transport | 1km spoor | 100m spoor | Passtuk (6m) | Referentieproces |
|---|----------------------------|---------------------------|--------------------------|--|
| Transport spoorstaaf per trein | 150 km * 54,3 kg/m * 1000m | | 150 km * 54,3 kg/m * 6m | 0133-tra&Transport, vrachttrein (o.b.v. Transport, freight train {Europe without Switzerland}) market for Cut-off, U) |
| Transport spoorstaaf per vrachtwagen | | 150 km * 54,3 kg/m * 100m | | Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Cut-off, U |
| Transport krol | 2 * (2 * 150km) * 15 ton | 1 * (2 * 150km) * 15 ton | 1 * (2 * 150km) * 15 ton | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 Cut-off, U |
| Transport mankracht (gemiddeld 2 man per wagen) | 12 * (2 * 100km) | 6 * (2 * 100km) | 2 * (2 * 100km) | 0102-pro&Benzine, gebruik, per km (o.b.v. Transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4 {RER} Alloc Rec, U; AANGEPAST) |
| Transport railauto | 3 * (2 * 150km) | 2 * (2 * 150km) | 1 * (2 * 150km) | 0102-pro&Benzine, gebruik, per km (o.b.v. Transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4 {RER} Alloc Rec, U; AANGEPAST) |

2.4. A5 Constructie

Belangrijkste aspecten van aanleg van spoorstaven is de inzet van krollen en thermietlassen om spoorstaven te verbinden. Klein mechanisch gereedschap is buiten beschouwing gelaten. Inzettuur van krollen per project grote is afgeleid aan de voorgaande ketenanalyse en gegevens uit de CAT. III LCA van spoorstaven.

Thermietlassen worden gezet met behulp van thermiet, een poeder van een metaalpoeder en metaaloxide. Het mengsel kan extreem heet branden in een zogenoemde thermietreactie. Thermietlassen voor verbinden van spoorstaven worden doorgaans uitgevoerd met ijzeroxide en aluminium. Aluminium wordt in de reactie geoxideerd, terwijl het ijzer mede door hoge temperaturen de nieuwe verbinden tussen spoorstaven kan vormen. Een mal zorgt dat de reactie op juiste locatie plaatsvindt.

De standaard thermietlas vindt plaats met een SoW-5 systeem/mal. De afstand tussen spoorstaven bij deze mal is standaard 29mm [8]. Vermenigvuldigd met een oppervlak van de doorsnede van een spoorstaaf (6981 mm² [9]), en het soortelijk gewicht van ijzer (7800 kg/m³), wat de las vormt, is berekend dat 1,579 kg ijzer tussen spoorstaven zal zitten. Het ijzer gehalte in ijzer(III)oxide is (110,97/159 g/mol =) 69,8%. Om voldoende ijzer voor de las te hebben is dan tenminste 1,579/69,8% = 2,263 kg ijzeroxide nodig. Voor een goede reactie is de massaverhouding ijzeroxide : aluminium, 3:1. 2,263/3 = 0,754 kg aluminium. Meestal is er echter fors overschot thermietpoeder, om de reactie voldoende lang gaande te houden. Er is aangenomen dat het overschot 50% betreft. Per thermietlas wordt dan gerekend met 3,394 kg ijzeroxide, en 1,131 kg aluminium. Achtergrond databases bevatten echter geen ijzeroxide, zodoende is gietijzer als dichtstbijzijnde referentieprofiel gekozen. Dat wordt beschouwd als een 'worst-case' benadering. Voor de reactie plaatsvindt worden spoorstaven eerst voorverwarmd met een brander, waarbij per las ca. 0,94 propaan (50MJ/kg) wordt gebruikt.

Het aantal lassen wat nodig is, is afhankelijk van de lengte waarop spoorstaven worden aangeleverd. In de gekozen scenario's zijn respectievelijk 4, 6, en 2 lassen nodig voor 1000m spoor, 100m spoor en een passtuk.

Tabel 5 Energie en emissies tijdens constructiefase

| Proces | 1km spoor | 100m spoor | Passtuk (6m) | Eenheid | Referentieproces |
|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|---|
| Krol inzet | 25,7 uur * 15 L/uur | 7 uur * 15 L/uur | 1 uur * 15 L/uur | L | 0095-pro&Diesel, gasolie, gebruik, liter (o.b.v. 35,8 MJ Diesel, burned in building machine {GLO} processing Cut-off, U) |
| Ijzeroxide poeder | 4 * 3,394 = 13,58 | 6 * 3,394 = 20,360 | 2 * 3,394 = 6,79 | kg | Cast iron {GLO} market for Cut-off, U |
| Aluminium | 4 * 1,131 = 4,52 | 6 * 1,131 = 6,79 | 2 * 1,131 = 2,26 | kg | 0151-fab&Aluminium (o.b.v. Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, U; 20% primair, 80% scrap) |
| Voorverwarmen las | 4 * 47,1 MJ/las = 188,4 | 6 * 47,1 MJ/las = 282,6 | 2 * 47,1 MJ/las = 94,2 | MJ | Propane, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, U |
| Slijptol | 2 | 3 | 1 | L | 0095-pro&Diesel, gasolie, gebruik, liter (o.b.v. 35,8 MJ Diesel, burned in building machine {GLO} processing Cut-off, U) |

2.5. B1-B7 Onderhoud

Het onderhoud is een belangrijke stap om de levensduur van spoorstaven te kunnen verlengen. Het belangrijkste onderhoud aan het spoor is het slijpen en/of frezen van de bovenste laag om beginnende defecten/scheurtjes weg te halen zodat deze niet groeien en uiteindelijk vroegtijdige vervangen van de spoorstaaf nodig is. Er zijn drie vormen van slijpen en/of frezen. Het spoor wordt cyclisch geslepen en gefreesd, waarbij de frequentie van slijpen afhankelijk is van de drukte van het baanvak. Druk bereiden spoor zoals Amsterdam-Utrecht wordt twee keer per jaar geslepen, terwijl de spoorlijn Leeuwarden – Harlingen haven slechts eens in de 5 tot 9 jaar geslepen wordt. Het verschil tussen frezen en slijpen is vrij eenvoudig, spoorstaven in tunnels worden gefreesd, waarbij het staalstof direct wordt opgevangen. Al het andere spoor wordt geslepen, waarbij het gros van het staalstof neerdaalt in de omgeving, zonder dat het opgevangen wordt.

Naast regulier cyclisch slijpen en frezen, wordt het spoor tevens geïnspecteerd op defecten. Wanneer een defect wordt ontdekt door de inspectietreinen, wordt de bovenste laag van de spoorstaaf gefreesd om het defect tijdig te verhelpen. In dat geval spreekt men van correctief frezen. Ook bij dit type frezen geldt dat correctief frezen vaker zal voorkomen op druk bereiden spoor.

Verzamelde gegevens over onderhoud zijn weergegeven in Tabel 6, maar vereisen enige toelichting hoe deze zijn bepaald. Volgens gegevens over 2013 is voor inspectie 240.000 L diesel verbruikt om 12634 km spoor te inspecteren, dat zijn gegevens van meerdere soorten inspectietreinen. Wanneer men corrigeert voor het feit dat op elk meter spoor, twee spoorstaven liggen, is het brandstof verbruik van inspectietreinen ca. 0,01L per meter spoorstaaf per jaar. Bij een gemiddelde levensduur van 42 jaar, is dat dus 0,42L diesel voor inspectie van het spoor.

De gemiddelde frequentie van cyclisch slijpen is lastig te bepalen. Volgens gegevens van Mathijs Doesberg wordt per jaar ± 420 keer een slijptrein ingezet waarbij de gemiddelde slijpafstand ca. 8km per inzet is. Hierin zijn grote lengtes met grotere treinen, en slijpen van wissels, spoorwegovergangen en dergelijk met kleinere treinen opgenomen. Totaal wordt er dan jaarlijks 3360 km spoor geslepen of gefreesd. Verdeeld over 7097 km spoor is het gemiddelde ongeveer 0,5 keer per jaar.

Het aantal keer dat er cyclisch en correctief wordt gefreesd verschilt per jaar. De schatting is dat er jaarlijks ± 50 -100 correctieve freesinzetten plaatsvinden en ± 30 cyclische freesinzetten. De lengte die op een nacht wordt gefreesd is wel een stuk lager, aangezien het freesproces intensiever is, en bij lagere snelheden gebeurd. De gemiddelde productielengte is ongeveer 1,5km, ofwel jaarlijks 45km en 112,5km respectievelijk cyclisch en correctief frezen. Cyclisch frezen gaat over specifieke stukken spoor (nl. tunnels), maar aangezien we een gemiddelde berekening van spoorstaven maken verdelen we de jaarlijkse lengtes over het gehele spoornetwerk. Cyclisch en correctief frezen tezamen gebeurd bij deze jaarlijkse lengtes 0,93 keer gedurende de hele levensduur (42 jaar). We ronden dit naar boven af: 1 maal gedurende de levensduur van een spoorstaaf.

Het brandstofverbruik van freestreinen is in een rapport van Vossloh Rail Maintenance [9] in kaart gebracht. In de eerste helft van 2020 werd 41.859L diesel verbruikt om 221,214 km spoor te frezen [10] (maal 2 spoorstaven = 442,428 km spoorstaven). Dat brandstof verbruik is exclusief transport van freestreinen naar freeslocatie. Per kilometer spoorstaaf wordt, per freesbeurt, $(41.859/442,428 =)$ 94,61 liter diesel verbruikt. Voor transport gebruiken de freestreinen 40 tot 60 L diesel per 100 km. Uitgaande van een transport afstand van 150km wordt voor heen- en terugreis ca. 150L diesel verbruikt. Verdeeld over een freesbeurt waar gemiddeld 1,5km wordt gefreesd is dat 50L diesel per kilometer gefreesd spoor extra $(94,61 + 50 = 144,61L)$.

Over het brandstofverbruik van slijptreinen zijn geen gedetailleerde gegevens bekend. Het is aannemelijk dat het brandstofverbruik lager ligt, aangezien het slijpproces minder intensief is vergeleken met een freesbeurt. Freestreinen opereren bij lage snelheid (5-15 km/u) omdat meer materiaal gefreesd moet worden. Slijptreinen halen doorgaans minder staal van de bovenste laag en kunnen bij hogere snelheden opereren. Ook worden zoals genoemd kleinere slijptreinen ingezet voor slijpen van kleine stukken spoor (wissels, overgangen e.d.). Het brandstofverbruik wordt daarom geschat op de helft van het brandstofverbruik van een freesbeurt. Dat is 47,30L/km. Dit wordt gezien als een conservatieve schatting, waarmee het brandstofverbruik zeer waarschijnlijk niet te laag wordt ingeschat. De brandstofkosten voor transport naar slijplocatie zullen vergelijkbaar zijn met een freestrein: 150L diesel verbruik voor de heen- en terugreis, welke wordt verdeeld over de gemiddelde lengte van 8km. Dat komt neer op 9,38L/km extra brandstof voor transport. $47,30 + 9,38 = 56,68$ L/km.

Tot slot is ook een benadering gemaakt hoeveel staal wordt afgenomen per frees- en slijpbeurt. Volgens experts van RailPro wordt bij cyclisch slijpen ongeveer 0,1mm verwijderd, bij frezen is dit ongeveer 0,3 tot 0,4mm om defecten voldoende weg te halen. Vermoedelijk zal freesdiepte ook afhangen van frequentie van frezen en de eventuele defecten. Voor de benadering van frezen wordt gerekend met een worst-case scenario waarin altijd 0,4mm wordt gefreesd. Uitgaande van een freesbreedte van 65mm (schatting omtrek kop), en een soortelijk gewicht van staal van 7800 kg/m³, is berekend dat ca. 202,8 kg staal per kilometer spoorstaaf wordt weggefreed. Bij slijpen is dit 50,7 kg/km. Het slijpsel verdwijnt deels als staalstof in het milieu neerdaalt of het wordt opgevangen dan wel naderhand verzameld om te worden gerecycled. Het grove uitgangspunt is dat 50% verloren gaat in het milieu, en 50% wordt opgevangen ter recycling. De baten van recyclen zijn opgenomen in

module D.

Naast emissie van freesafval is er ook sprake van emissie door slijtage van de spoorstaaf naar de bodem. Met als gevolg dat de massa balans in module C en D ook anders is. Het is echter niet eenvoudig vast te stellen hoeveel de gemiddelde spoorstaaf slijt als gevolg van gebruik. Dat hangt samen met de baanvakklasse, maar vooral ook de levensduur van de spoorstaaf. Als deze eerder wordt vervangen vanwege een defect is de hoeveelheid slijtage minder dan een spoorstaaf die defect-vrij lang is gebruikt. De gemiddelde slijtage behoeft dan ook nadere studie.

Tabel 6 Onderhoud gedurende de levensduur per meter spoorstaaf

| Proces/handeling | Hoeveelheid per meter spoor | Hoeveelheid per meter spoor - passtuk | Eenheid | Referentieproces |
|-------------------------------|---|---|---------|---|
| Inspectietreinen | 0,42 | 0,1 | L | 0095-pro&Diesel, gasolie, gebruik, liter (o.b.v. 35,8 MJ Diesel, burned in building machine {GLO}) processing Cut-off, U) |
| Cyclisch slijpen | $0,05668 * 0,5 * 42$ | $0,05668 * 0,5 * 10$ | L | 0095-pro&Diesel, gasolie, gebruik, liter (o.b.v. 35,8 MJ Diesel, burned in building machine {GLO}) processing Cut-off, U) |
| Cyclisch en correctief frezen | 0,14461 | $0,14461 * (10/42)$ | L | 0095-pro&Diesel, gasolie, gebruik, liter (o.b.v. 35,8 MJ Diesel, burned in building machine {GLO}) processing Cut-off, U) |
| Transport freesafval | $100 \text{ km} * 0,5 * ((0,0507 * 0,5 * 42) + (0,2028 \text{ kg} * 1)) = 63,375$ | $100 \text{ km} * 0,5 * ((0,0507 * 0,5 * 10) + (0,2028 * (10/42))) = 15,09$ | kgkm | Transport, freight train {Europe without Switzerland} diesel Cut-off, U |
| Emissie freesafval | 0,6338 | 0,1509 | kg | Iron naar bodem |

2.6. C1 Sloop

Gegevens voor sloop van spoorstaven (ter vervanging), vindt bij grotere vervanging plaats m.b.v. een werktrein. Voor de huidige CAT III LCA van spoorstaven is geïnventariseerd dat met gebruik van een werktrein gemiddeld 613 meter spoor per nacht verwijderd kan worden, waarbij de werktrein ca. 600L diesel verbruikt. Op basis van een nacht van ca. 8 uur, zijn die gegevens geëxtrapoleerd naar een project van 1000m.

Gegevens voor verwijderen van kleinere lengtes spoorstaven is ook geïnventariseerd. In dat geval wordt geen werktrein, maar een krol ingezet, waarmee per 6 uur ca. 76 meter spoor kan verwijderen. Het dieselverbruik van een krol is 15L/uur. Deze gegevens zijn wederom geëxtrapoleerd naar een lengte van 100 meter.

De spoorstaven worden in stukken gesneden en afgevoerd voor recycling of hergebruik. Het uitgangspunt is dat bij grotere spoorvernieuwing projecten de spoorstaven per trein kunnen worden afgevoerd, waardoor langere lengtes mogelijk zijn. Het uitgangspunt voor 1km spoor vernieuwing is 25 stukken van 40 meter. In het scenario voor 100 meter spoor, wordt ervanuit gegaan dat spoorstaven per vrachtwagen worden afgevoerd, in lengtes van maximaal 24m. Het aantal snijacties is a.d.h.v. deze uitgangspunten bepaald. Het verbruik aan brandstof om de spoorstaaf door te snijden wordt geschat op 0,5L per snijactie.

Er wordt vanuit gegaan dat het passtuk niet afzonderlijk verwijderd zal worden, maar mee wordt genomen in sloop van een stuk van 100 meter spoor.

Tabel 7 Energie en emissies tijdens sloopfase

| | 1km spoor | 100m spoor | Passtuk (6m) | Referentieproces |
|-----------------|--------------------|------------|--------------|---|
| Inzet werktrein | 12,5 uur * 80L/uur | - | - | 0095-pro&Diesel, gasolie, gebruik, liter (o.b.v. 35,8 MJ Diesel, burned in building machine {GLO}) processing Cut-off, U) |

| | 1km spoor | 100m spoor | Passtuk (6m) | Referentieproces |
|-------------------------------|------------|--------------------|------------------------------|--|
| Inzet krol | - | 7,5 uur * 15 L/uur | (6/100) * 7,5 uur * 15 L/uur | 0095-pro&Diesel, gasolie, gebruik, liter (o.b.v. 35,8 MJ Diesel, burned in building machine {GLO}) processing Cut-off, U) |
| In stukken snijden spoorstaaf | 26 * 0,5 L | 6 * 0,5 L | (6/20) * 0,5 L | 0095-pro&Diesel, gasolie, gebruik, liter (o.b.v. 35,8 MJ Diesel, burned in building machine {GLO}) processing Cut-off, U) |

2.7. C2 Transport naar verwerking

Spoorstaven worden afgevoerd ter recycling of hergebruik. Daarbij gaan we uit van forfaitaire transportafstand van 100 km. Het gewicht van de spoorstaaf is gedurende de levensduur afgenomen omdat deze is geslepen en gefreesd waarbij telkens een klein laagje staal is verwijderd. Daar is rekening mee gehouden in het te transporteren gewicht. De nieuwe spoorstaaf weegt 54,3 kg bij ingebruikname. Volgens benadering in paragraaf 2.5, wordt bij elke frees- en slijp actie wordt respectievelijk ca. 0,2028 kg en 0,0507 kg per meter spoorstaaf verwijderd. Na een gemiddeld aantal frees en slijp acties resteert een gewicht van 53,033kg bij einde levensduur. Bij een passtuk ligt dit gewicht hoger omdat deze vanwege de kortere levensduur minder vaak hoeft worden onderhouden.

Tabel 8 Transport naar afvalverwerking

| Transport | 1km spoor | 100m spoor | Passtuk (6m) | Referentieproces |
|--------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--|
| Transport spoorstaaf per trein | 100 km * 53,033 kg/m * 1000m | - | - | 0133-tra&Transport, vrachttrein (o.b.v. Transport, freight train {Europe without Switzerland}) market for Cut-off, U) |
| Transport spoorstaaf per vrachtwagen | - | 100 km * 53,033 kg/m * 100m | 100 km * 53,195 kg/m * 6m | Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 Cut-off, U) |

2.8. C3 en C4 Afvalverwerking

Bij einde leven van de spoorstaaf kan deze afhankelijk van de kwaliteit ofwel opnieuw ingezet worden in een zijspoor (minder intensief bereiden spoor) ofwel volledig gerecycled worden. Als de spoorstaaf gerecycled wordt kan deze direct worden omgesmolten in de productie van nieuw staal. Er komt geen verdere opwerking aan te pas, en het materiaal wordt niet gestort. Daarom zijn geen processen opgenomen in deze twee levenscyclusfasen.

2.9. D Terugwinning

In module D worden de baten en lasten verrekend van hetgeen zich buiten de systeemgrenzen van de LCA afspeelt. In de scenario's wordt ervan uitgegaan dat de spoorstaaf als schroot wordt gerecycled in nieuw staal. Hierin is ook recycling van staalstof wat is opgevangen tijdens onderhoud aan het spoor in opgenomen. Volgens de EN15804 kunnen baten worden toegerekend aan het materiaal wat in A1 als primair materiaal is gebruikt. Verlies van secundair materiaal levert lasten op, welke worden verrekend met de baten.

Tabel 9 Baten en lasten buiten de systeemgrens (recycling) per meter spoorstaaf

| | Hoeveelheid | Eenheid | Referentieproces |
|---|---|---------|--|
| Baten recylen spoorstaaf (per meter) | 53,033 kg * 0,89 = 47,20 | kg | 0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd ongelegeerd schroot (World Steel methode obv Steel, low-alloyed {RER&RoW}) steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW}) steel production, converter, unalloyed Cut-off, U) |
| Baten en lasten recylen staalstof van onderhoud | (0,5 * 42 * 0,0507 + 0,2028 * 1) * (0,89*0,5 – 0,11*0,5) = 0,494 | kg | 0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd ongelegeerd schroot (World Steel methode obv Steel, low-alloyed {RER&RoW}) steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW}) steel production, converter, unalloyed Cut-off, U) |
| Baten recylen passtuk (per meter) | 53,195 kg * 0,89 = 47,34 | kg | 0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd ongelegeerd schroot (World Steel methode obv Steel, |



| | Hoeveelheid | Eenheid | Referentieproces |
|---|--|---------|--|
| Baten en lasten recycling staalstof van onderhoud passtuk | $(0,5 * 10 * 0,0507 + 0,2028 * (10/42)) * (0,89 * 0,5 - 0,11 * 0,5)$ = 0,118 | kg | low-alloyed {RER&RoW} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U) 0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd ongelegeerd schroot (World Steel methode obv Steel, low-alloyed {RER&RoW} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U) |

3. LEVENSCYCLUS-EFFECTBEOORDELING

3.1. Procedures, berekeningen en resultaten

De waarden van de effectcategorieën zijn berekend door milieu-ingrepen uit de inventarisatie toe te wijzen aan effectcategorieën. Conform paragraaf 3.5 van de bepalingsmethode zijn deze effectcategorieën omgerekend naar een milieukosten indicator (MKI) in euro's.

3.2. Milieueffect wegen

Milieueffect wegen is een proces waarbij de resultaten van verschillende impactcategorieën worden omgezet op basis van de numerieke factoren op waardekeuzes. Er kan aggregatie van de milieueffectscores plaatsvinden. Om het doel van de studie te bereiken wordt in deze analyse gebruik gemaakt van de Milieu Kosten Indicator (MKI) om de verschillende impactcategorieën te wegen tot één eindpunt.

In onderstaande tabel staan de uitkomsten als MKI-waarde voor het onderwerp van de analyse weergegeven.

Tabel 10 Resultaten MKI

| | 1 km spoor vernieuwen | 100m spoor vernieuwen | Passtuk plaatsen | 1 km spoor vernieuwen per meter | 100m spoor vernieuwen per meter | Passtuk plaatsen per meter | Aandeel |
|--|-----------------------|-----------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Totaal | € 11.582,33 | € 1.304,56 | € 167,37 | € 11,58 | € 13,05 | € 27,89 | |
| A1 – A3 Grondstoffen en productie | € 17.410,59 | € 1.741,06 | € 104,47 | € 17,41 | € 17,41 | € 17,41 | 62,4 - 150,3% |
| A4 Transport naar Werk | € 290,10 | € 131,65 | € 97,48 | € 0,29 | € 1,32 | € 16,25 | 2,5 - 58,2% |
| A5 Constructie | € 178,18 | € 53,65 | € 7,13 | € 0,18 | € 0,54 | € 1,19 | 1,5 - 4,3% |
| B1-B7 Onderhoud | € 767,81 | € 76,78 | € 1,10 | € 0,77 | € 0,77 | € 0,18 | 0,7 - 6,6% |
| C1 Sloop | € 442,93 | € 47,22 | € 2,82 | € 0,44 | € 0,47 | € 0,47 | 1,7 - 3,8% |
| C2 Transport naar verwerking | € 33,25 | € 8,25 | € 0,08 | € 0,03 | € 0,08 | € 0,01 | 0,0 - 0,6% |
| C3 Afvalverwerking | € 0,00 | € 0,00 | € 0,00 | € 0,00 | € 0,00 | € 0,00 | 0% |
| C4 Stort | € 0,00 | € 0,00 | € 0,00 | € 0,00 | € 0,00 | € 0,00 | 0% |
| D Baten en lasten buiten de systeemgrens | € -7.540,53 | € -754,05 | € -45,70 | € -7,54 | € -7,54 | € -7,62 | - 27,3 - 65,1% |

Tabel 11 Resultaten GWP (CO₂-eq)

| | 1 km spoor vernieuwen | 100m spoor vernieuwen | Passtuk plaatsen | 1 km spoor vernieuwen per meter | 100m spoor vernieuwen per meter | Passtuk plaatsen per meter | Aandeel |
|--|--------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------|
| Totaal | 75.608,46 | 8.904,41 | 1.377,95 | 75,61 | 89,04 | 229,66 | |
| A1 – A3 Grondstoffen en productie | 121.365,50 | 12.136,61 | 728,24 | 121,37 | 121,37 | 121,37 | 52,8 – 160,5% |
| A4 Transport naar Werk | 2.724,79 | 1.282,61 | 925,35 | 2,72 | 12,83 | 154,22 | 3,6 – 67,2% |
| A5 Constructie | 1.336,78 | 400,80 | 52,82 | 1,34 | 4,01 | 8,80 | 1,8 - 4,5% |
| B1-B7 Onderhoud | 5.766,34 | 576,63 | 8,24 | 5,77 | 5,77 | 1,37 | 0,6 – 7,6% |
| C1 Sloop | 3.326,49 | 354,65 | 21,18 | 3,33 | 3,55 | 3,53 | 1,7 - 4,4% |
| C2 Transport naar verwerking | 249,97 | 69,25 | 0,69 | 0,25 | 0,69 | 0,11 | 0,0 – 0,8% |
| C3 Afvalverwerking | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0% |
| C4 Stort | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0% |
| D Baten en lasten buiten de systeemgrens | -59.161,40 | -5.916,14 | -358,56 | -59,16 | -59,16 | -59,76 | -26,0 – -78,2% |

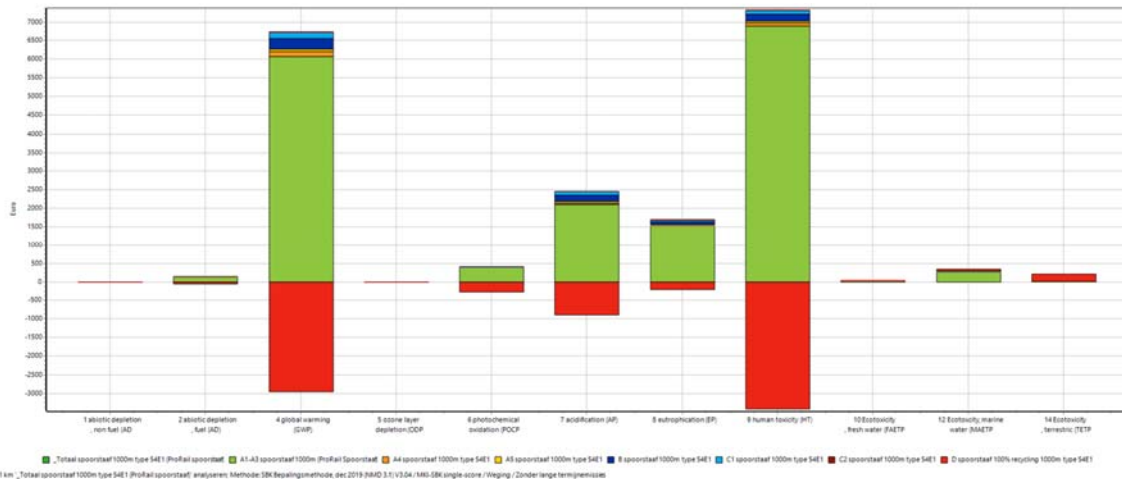
4. LEVENSCYCLUS-INTERPRETATIE

4.1. Aanpak interpretatie

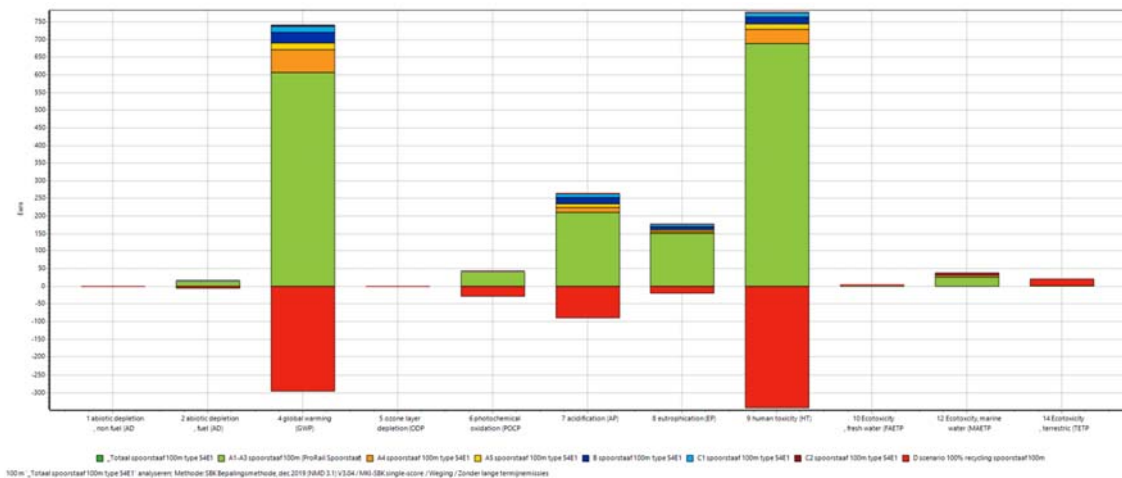
In dit hoofdstuk worden op twee manieren de resultaten uit het vorige hoofdstuk geïnterpreteerd. Ten eerste wordt gekeken naar de gewogen eindscore op basis van de MKI-waarde. Ten tweede wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op basis van de MKI-zwaartepunt analyse.

4.2. Zwaartepuntanalyse

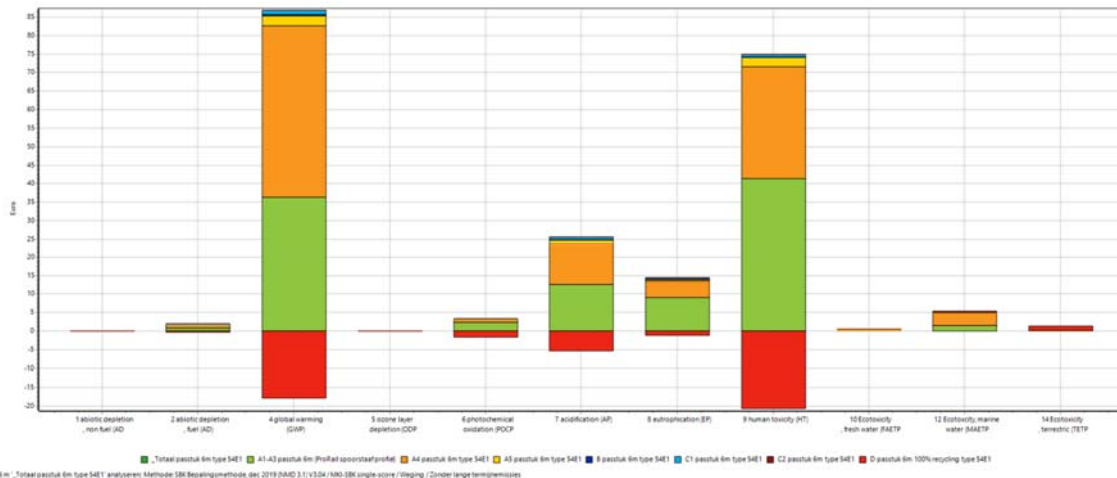
In een zwaartepuntanalyse wordt gekeken naar het zwaartepunt van de milieu-impact op basis van de MKI score. In onderstaande figuren zijn de zwaartepuntanalyses van de drie scenario's weergegeven. Daarbij valt op dat het zwaartepunt op de productie van de spoorstaaf (A1-A3; groen) ligt, en in zeker mate diens recycling en daaraan verbonden baten (D; rood). Naar mate de project grote waarin de spoorstaaf kleiner wordt, nemen andere levenscyclus fasen een grotere rol in de zwaartepunt verdeling in. Dat valt vooral op bij het passtuk, waarin transport (A4; oranje) van de werkploeg die het passtuk gaat plaatsen een grotere rol gaat spelen, vooral in de impact categorie Global Warming (CO₂-eq emissie). Dit verschil is geen verassing, langere stukken spoor plaatsen is efficiënter. Het doel van het plaatsen van een passtuk is echter wel een hele andere dan vervanging van 100m of een kilometer spoor. Als een klein defect kan worden verholpen door een passtuk te plaatsen waarmee omliggend stuk spoor jaren lager mee gaat, dan heeft dat de voorkeur boven vervanging van een kilometer lang stuk spoor.



Figuur 2 Zwaartepuntanalyse 1000m spoorstaaf



Figuur 3 Zwaartepuntanalyse 100m spoorstaaf



Figuur 4 Zwaartepuntanalyse passtuk 6m

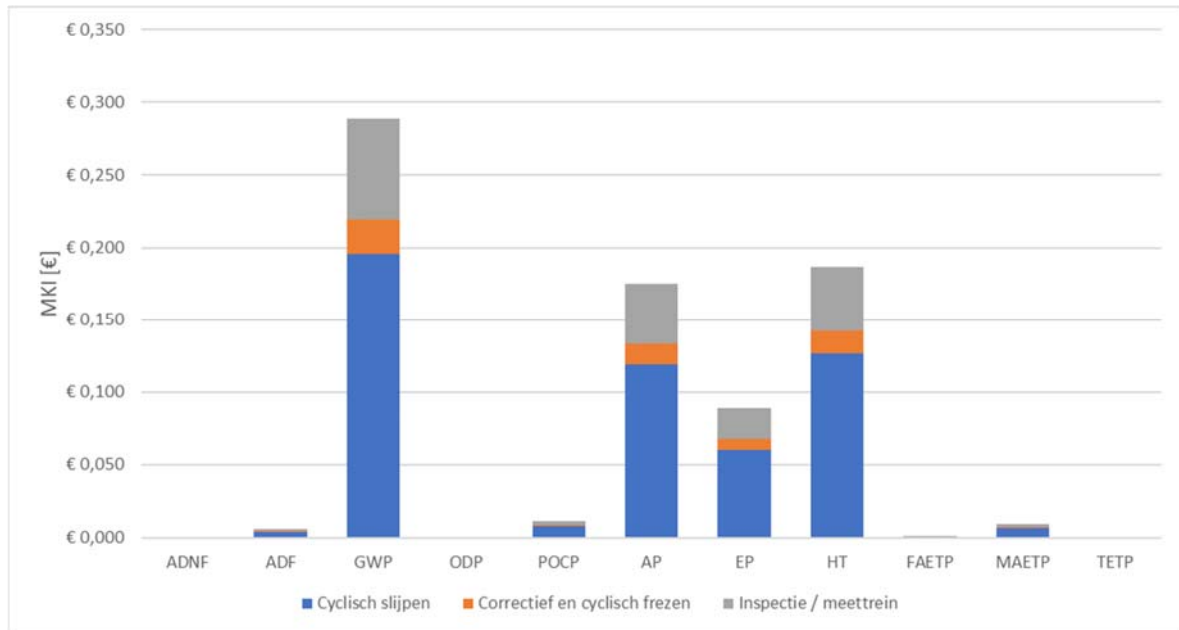
Een derde levensfase die, bij stukken van 1km of 100m spoor, enigszins significant genoemd kan worden (tot 6,6% van de MKI) is het onderhoud (B; donker blauw). Onderhoud draagt bij aan de levensduur van spoorstaven, maar het onderhoud wordt grotendeels uitgevoerd met dieseltreinen, waardoor onderhoud met name relatief hoog scoort in CO₂ emissie resultaten (tot 7,6% van CO₂-eq emissies).

Het onderhoud bestaat uit meerdere acties. In deze analyse is gekeken naar cyclisch slijpen/frezen, correctie frezen en inzet van inspectietreinen. Van die drie heeft cyclisch slijpen en frezen de relatief grootste impact, vanwege de regelmaat waarmee het plaatsvindt. Correctief frezen komt gemiddeld gezien minder vaak voor, omdat alleen bij een groter defect extra slijpen van rails nodig is.

Het positieve effect van het onderhoud kan echter niet worden weergegeven in de berekeningen. Door constante onderhoud zal het plaatsen van een passtuk of gehele vervanging van spoor minder vaak voor hoeven komen, en zal de algehele levensduur van de spoorstaaf een stuk langer zijn. Desondanks zou elektrificeren van het onderhoud, mits mogelijk, CO₂ emissies en MKI kunnen reduceren.

Tabel 12 MKI en CO₂ emissie van onderdelen van onderhoud (B) per meter spoorstaaf (m.u.v. passtuk)

| Onderhoud onderdelen | MKI over levensduur (42 jaar) | kg CO ₂ -eq emissie over levensduur (42 jaar) | MKI per jaar | CO ₂ -eq emissie per jaar |
|-------------------------------|-------------------------------|--|----------------|--------------------------------------|
| Inspectie/meettreinen | € 0,184 | 1,379 | € 0,004 | 0,033 |
| Cyclisch slijpen | € 0,521 | 3,912 | € 0,012 | 0,093 |
| Cyclisch en correctief frezen | € 0,063 | 0,475 | € 0,002 | 0,011 |
| Totaal | € 0,768 | 5,766 | € 0,018 | 0,137 |



Figuur 5 Zwaartepuntsanalyse per onderdeel van het onderhoud

4.3. Gevoeligheidsanalyse / verbeter mogelijkheden

In deze paragraaf worden profiel keuzes en aannames onder de loep genomen. Ook worden in het kader van dit onderzoek verbeteringsopties belicht. Daarbij ligt de nadruk op aspecten van de ketenanalyse met een hoge impact. Die hoge impact ligt vooral bij productie van de spoorstaaf, en het recyclen van de spoorstaaf.

Voor productie van spoorstaven is in de initiële berekening uitgegaan van een custom staalprofiel voor spoorstaven. Op zich zijn dit al relatief gunstige gegevens. Echter, de berekende spoorstaven worden nog grotendeels vervaardigd uit primair materiaal (89%), en productie vindt plaats in een hoogoven. Vermoedelijk zijn er daarom nog verbeteringen te behalen.

Ter vergelijking is een berekening gemaakt op basis van de meest recente EPD gegevens van voestalpine spoorstaven, geleverd door RailPro. Daarnaast is ook een berekening gemaakt voor spoorstaaf van laag-gelegeerd staal uit een vlamboogoven met 100% secundair materiaal. Van vooral die laatste optie is de verwachting dat MKI en CO₂ lager zijn dan in de initiële berekening. De modelering van de extra opties is weergegeven in Tabel 13. De resultaten per meter spoorstaaf van modules A1 en D zijn weergegeven in Tabel 14 en Tabel 15. Door een andere profielkeuze in A1 veranderd ook het resultaat in module D, omdat hoeveelheid secundair materiaal effect heeft op de baten buiten de systeemgrenzen.

Tabel 13 Additionele opties spoorstaaf referentieprofiel

| Spoorstaaf productie | Referentieprofiel |
|--|---|
| Op maat gemaakt profiel voor spoorstaafstaal (initiële berekening) | Spoorstaven staal 54E1 R260Mn, met 1,7% Mn (o.b.v. Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, U) |
| EPD Voestalpine | A1-A3 Spoorstaaf 54E1 Voestalpine [7] |
| Laaggelegeerd staal, EAF (per kg) | 1 kg Steel, low-alloyed {RER} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U + 1 tkm 0133-tra&Transport, vrachttrein (o.b.v. Transport, freight train {Europe without Switzerland}) market for Cut-off, U) + 1 kg Hot rolling, steel {RER} processing Cut-off |

Tabel 14 Effect op MKI van spoorstaaf productieprofiel op fase A1-A3 en D per meter spoorstaaf

| MKI [€] | Spoorstaafstaal 54E1 R260Mn met 1,7% Mn (11% secundair) | Spoorstaaf voest Alpine (17,4% secundair) | Spoorstaaf uit vlamboogoven (100% secundair) |
|---------|---|---|--|
| A1-A3 | € 17,41 | € 14,20 | € 7,69 |
| D | € -7,54 | € -6,99 | € 0,10 |
| Totaal | € 9,87 | € 7,21 | € 7,79 |

Tabel 15 Effect op CO₂ emissie van spoorstaaf productieprofiel op fase A1 en D per meter spoorstaaf

| CO ₂ [kg] | Spoorstaafstaal 54E1 R260Mn met 1,7% Mn (11% secundair) | Spoorstaaf voest Alpine (17,4% secundair) | Spoorstaaf uit vlamboogoven (100% secundair) |
|----------------------|---|---|--|
| A1-A3 | 121,37 | 109,06 | 57,24 |
| D | -59,16 | -54,85 | 0,79 |
| Totaal | 62,20 | 54,21 | 58,03 |

Zowel de spoorstaaf van Voestalpine als de fictieve spoorstaaf van 100% secundair materiaal uit een vlamboogoven komen een stukje beter uit de vergelijking. De MKI (van module A1 + D) is grofweg 20-25% lager, en CO₂ emissies zijn 7-13% lager. Dat de cijfers van Voestalpine het laagst scoren heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat actuele en up-to-date productie gegevens gebruikt zijn. Op zich is de productie methode namelijk niet anders dan de originele spoorstaaf. Op eenzelfde datakwaliteit niveau zou de spoorstaaf uit een vlamboogoven naar verwachting nog beter scoren. Bij de duurzaamheid van spoorstaven uit een vlamboogoven moeten echter enkele kanttekeningen worden gemaakt.

In deze analyse is niet gekeken naar de haalbaarheid van spoorstaven uit vlamboogovens. Het is onbekend of staal uit vlamboogovens voldoende kwaliteit heeft om te dienen als spoorstaven, of dat de juiste legering van worden verkregen. Ook is het de vraag of voldoende secundair staal beschikbaar is om spoorstaven van te maken. Als er een tekort aan kwalitatief staalschroot is, kan er een omgekeerd waterbed effect optreden, waardoor andere staalfabrikanten nu minder vlamboogoven staal kunnen toepassen. Desalniettemin, is het gezien de theoretische resultaten wel interessant deze optie door experts bij ProRail nader te onderzoeken.

De kanttekeningen bij staal uit vlamboogovens leiden ons tot een andere mogelijke verbetering; namelijk recyclen van spoorstaven van ProRail. In de initiële berekening is er vanuit gegaan dat spoorstaven laagwaardig worden gerecycled. Men heeft op het moment geen goed beeld hoe spoorstaven worden verwerkt. Deze worden namelijk vaak meegegeven met aannemers. Het is daarom goed mogelijk dat de legeringselementen in laagwaardiger staal wordt verwerkt. Desalniettemin blijven deze en ook de onderstaande benadering theoretische berekeningen omdat de precieze details niet bekend zijn.

In de onderstaande analyse zijn naast laagwaardig recyclen, ook hoogwaardig recyclen (behoud van legeringscompositie) en hergebruik opgenomen. Bij het hoogwaardig recyclen worden spoorstaven gerecycled in een vlamboogoven, zonder dat daar staal van een andere kwaliteit aan wordt toegevoegd. Zo kan men garanderen dat staal met dezelfde legeringselementen kan worden vervaardigd uit de vlamboogoven. De modelering van alle opties is weergegeven in Tabel 16, en resultaten zijn weergegeven in Tabel 17.

Tabel 16 Additionele opties spoorstaaf recycling of hergebruik referentieprofielen

| Spoorstaaf hergebruik / recycling | Referentieprofiel |
|--|--|
| Laagwaardig recyclen (initiële berekening) | 0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd ongelegeerd schroot (World Steel methode obv Steel, low-alloyed {RER&RoW} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U) |
| Hoogwaardig recyclen (behoud van | 0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd Spoorstaafstaal 54E1 R260Mn (World Steel methode obv Steel, low-alloyed {RER&RoW} steel |

| Spoorstaaf hergebruik / recycling | Referentieprofiel |
|-----------------------------------|--|
| legeringscompositie) | production, electric, low-alloyed Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U) (standaard profiel aangepast) |
| Hergebruik | Uitsparing van Spoorstaven staal 54E1 R260Mn, met 1,7% Mn (o.b.v. Steel, low-alloyed {RER}) steel production, converter, low-alloyed Cut-off, U) met kwaliteitsfactor voor slijpen/frezen + recycling (baten+lasten) slijp en freesafval met 0282-reD&Module D, staal, per kg NETTO geleverd ongelegeerd schroot (World Steel methode obv Steel, low-alloyed {RER&RoW}) steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U - Steel, unalloyed {RER&RoW} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U) |

Tabel 17 Effect op MKI en CO₂ emissie van module D referentieprofiel per meter spoorstaaf

| | Laagwaardig recyclen | Hoogwaardig recyclen | Hergebruik |
|--------------------------|----------------------|----------------------|------------|
| MKI module D | € -7,54 | € -9,58 | € -15,07 |
| CO ₂ module D | -59,16 | -62,65 | -101,74 |

Uit de drie opties valt op dat hergebruik en hoogwaardig recyclen scoren fors beter dan laagwaardig recyclen. Op het geheel kan zeker voordeel worden behaald wanneer beide vaker worden toegepast. Bij hergebruik moet wel een kanttekening gezet worden. Hergebruik is niet altijd mogelijk. Dat hangt af van de kwaliteit van de spoorstaaf bij het einde van zijn leven, maar hangt vooral ook af van de behoefte aan een hergebruikte spoorstaaf. Spoorstaven kunnen alleen opnieuw worden ingezet in zijsporen of anderszins niet vaak bereden spoor. Spoor waar minder frequent wordt gereden gaat echter ook langer mee, dus behoefte aan hergebruikte spoorstaven is laag.

De tweede beste optie is hoogwaardig recyclen van spoorstaven. In dit geval geldt wederom de vraag of de kwaliteit van het staal uit een vlamboogoven voldoende is voor inzet als spoorstaaf. In dit scenario wordt in ieder geval wel voldaan aan de compositie van legeringselementen, maar nader onderzoek van spoorstaaf experts bij ProRail wordt geadviseerd.

Bij de resultaten in Tabel 17 moet nog de kanttekening worden geplaatst dat slijtage van spoorstaven door gebruik nog niet is opgenomen in de berekeningen. Afhankelijk van de hoeveel slijtage, zullen de resultaten in module D minder gunstig uitkomen wanneer slijtage is opgenomen. De verhouding tussen de verschillende opties van recyclen/hergebruik blijft desalniettemin gelijk.

5. CONCLUSIE

Uit de theoretische gevoeligheidsanalyse / analyse van verbetering t.a.v. verduurzaming van spoorstaven, komen een aantal opties naar voren die verder onderzoek behoeven.

Aan de achterkant van de levenscyclus, bij eind van de levensduur, kan mogelijk winst worden behaald. Hergebruik van spoorstaven geeft de grootste winst wat betreft milieupact en CO₂ emissies, al is de mogelijkheid tot hergebruik beperkt. Hoogwaardig recyclen heeft vermoedelijk per saldo een grotere impact (op reductie van milieupact en CO₂ emissie), omdat dit vrijwel altijd mogelijk is. Het idee is om spoorstaven te recyclen tot nieuwe spoorstaven, waardoor men de cyclus (deels) sluit. Dit gebeurt in hoeverre bekend nog niet. Deze optie zou verder moeten worden onderzocht of de kwaliteit van spoorstaven uit vlamboogovens volstaat voor gebruik in het Nederlands spoornetwerk.

Desalniettemin kan de cyclus überhaupt niet geheel gesloten worden, omdat er altijd sprake is van slijtage van spoorstaven door onderhoud en gebruik zelf. Slijtage door het gebruik van spoorstaven is nog niet opgenomen in de berekeningen en vraagt verder onderzoek. Als gevolg van slijtage gaat een deel van de spoorstaven verloren als staalstof naar het milieu, waardoor de massa balans in de levenscyclus nooit op 0 zal uitkomen. Men zal daarom aangewezen blijven op (een deel) primaire spoorstaven uit hoogovens. Een reductie van de behoefte aan primair staal valt mogelijk wel te behalen.

6. BRONVERMELDING

- [1] NEN-EN-ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006, IDT), juli 2006
- [2] NEN-EN-ISO 14044 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006, IDT), juli 2006
- [3] NEN-EN 15804+A1:2013 Duurzaamheid van bouwwerken – Milieuverklaringen van producten – Basisregels voor de productgroep bouwproducten, november 2013
- [4] Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW werken versie 3.0, januari 2019, inclusief wijzigingsbladen d.d. juli 2019 en januari 2020
- [5] (Nationale Milieu Database): NMD versie 3.2
- [6] (Eco-invent): Ecoinvent Database versie 3.5
- [7] EPD Spoorstaaf Voestalpine 54E1 en 54E1, 09-03-2021
- [8] THERMIT welding processes, Goldschmidt Smart Rail Solutions, SoW-5, beschikbaar op: <https://www.elektro-thermit.de/en/rail-joining/thermitr-welding-processes/> (geraadpleegd 9-2-2021)
- [9] Het 2^e leven van spoorstaven in een modulaire demontabele spoortraverse, constructieve uitwerking, p8, tabel 2-4, Martijn Zegers, HVA, 2018
- [10] CO₂ management plan 2020, cyclic and corrective rail milling for ProRail, Vossloh Rail Maintenance, 21-10-2020

BIJLAGE A WEGING & MILIEUPROFIELEN

| Calculation: | Analyse | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|-------------|---|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Results: | Effectbeoordeling | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Product: | 1 km _Totaal spoorstaaf 1000m type 54E1 (ProRail spoorstaaf) (van project 26.20.00125 ProRail Spoorstaaf ketenanalyse) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Methode: | SBK Bepalingsmethode, dec 2019 (NIMD 3.1) V3.04 / MKI-SBK single-score | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Indicator: | Weging | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Skip categories: | Met resultaat = 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Default units: | Ja | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sluit infrastructuurprocessen uit: | Nee | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sluit lange termijnmissies uit: | Ja | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sorted on item: | Effectcategorie | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sort order: | Oplopend | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Effectcategorie | Eenheid | Totaal | A1-A3 spoorstaaf 1000m (ProRail Spoorstaaf) | A4 spoorstaaf 1000m type 54E1 | A5 spoorstaaf 1000m type 54E1 | B spoorstaaf 1000m type 54E1 | C1 spoorstaaf 1000m type 54E1 | C2 spoorstaaf 1000m type 54E1 | D spoorstaaf 1000m type 54E1 | | | | | | | | | | |
| MKI | Euro | € 11.582,33 | € 17.410,59 | € 290,10 | € 178,18 | € 767,81 | € 442,93 | € 33,25 | € -7.540,53 | | | | | | | | | | |
| 1 abiotic depletion, non fuel (AD) | kg Sb eq | 1,25E+00 | 1,20E+00 | 5,20E-03 | 1,70E-03 | 1,95E-03 | 1,12E-03 | 4,19E-04 | 3,96E-02 | | | | | | | | | | |
| 2 abiotic depletion, fuel (AD) | kg Sb eq | 5,67E+02 | 8,34E+02 | 1,92E+01 | 9,23E+00 | 3,99E+01 | 2,30E+01 | 1,73E+00 | -3,61E+02 | | | | | | | | | | |
| 4 global warming (GWP) | kg CO2 eq | 75.608,46 | 1,21E+05 | 2,72E+03 | 1,34E+03 | 5,77E+03 | 3,33E+03 | 2,50E+02 | -5,92E+04 | | | | | | | | | | |
| 5 ozone layer depletion (ODP) | kg CFC-11 eq | 7,41E-03 | 7,74E-04 | 4,74E-04 | 2,36E-04 | 1,05E-03 | 6,03E-04 | 3,14E-05 | -2,71E-03 | | | | | | | | | | |
| 6 photochemical oxidation (POCP) | kg C2H4 | 6,98E+01 | 1,96E+02 | 1,45E+00 | 1,34E+00 | 5,84E+00 | 3,37E+00 | 1,74E-01 | -1,39E+02 | | | | | | | | | | |
| 7 acidification (AP) | kg SO2 eq | 3,94E+02 | 5,26E+02 | 9,00E+00 | 9,93E+00 | 4,37E+01 | 2,52E+01 | 1,71E+00 | -2,22E+02 | | | | | | | | | | |
| 8 eutrophication (EP) | kg PO4--- eq | 1,66E+02 | 1,69E+02 | 1,62E+00 | 2,21E+00 | 9,84E+00 | 5,68E+00 | 3,34E-01 | -2,25E+01 | | | | | | | | | | |
| 9 human toxicity (HT) | kg 1,4-DB eq | 4,34E+04 | 7,66E+04 | 9,76E+02 | 4,99E+02 | 2,08E+03 | 1,20E+03 | 1,07E+02 | -3,80E+04 | | | | | | | | | | |
| 10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP) | kg 1,4-DB eq | 1,56E+03 | 9,93E+02 | 2,30E+01 | 6,93E+00 | 2,90E+01 | 1,67E+01 | 1,53E+00 | 4,91E+02 | | | | | | | | | | |
| 12 Ecotoxicity, marine water (MAETP) | kg 1,4-DB eq | 3,40E+06 | 2,61E+06 | 8,58E+04 | 2,36E+04 | 9,77E+04 | 5,63E+04 | 6,03E+03 | 5,29E+05 | | | | | | | | | | |
| 14 Ecotoxicity, terrestrial (TETP) | kg 1,4-DB eq | 3,53E+03 | 2,08E+02 | 3,19E+02 | 1,74E+00 | 3,44E+00 | 1,98E+00 | 5,67E-01 | 3,31E+03 | | | | | | | | | | |
| PERT | MJ | 7,00E+04 | 6,23E+04 | 7,75E+02 | 1,50E+02 | 4,89E+02 | 2,82E+02 | 3,08E+02 | 5,72E+03 | | | | | | | | | | |
| PENRT | MJ | 1,16E+06 | 1,44E+06 | 4,33E+04 | 2,05E+04 | 8,95E+04 | 5,16E+04 | 4,02E+03 | -4,80E+05 | | | | | | | | | | |
| Water consumption (FW) | m3 | 1,06E+03 | 1,24E+03 | 8,59E+00 | 2,93E+00 | 1,16E+01 | 6,67E+00 | 1,95E+00 | -2,17E+02 | | | | | | | | | | |
| Hazardous waste (HWD) | kg | 2,41E+00 | 1,04E+01 | 2,63E-02 | 2,19E-02 | 3,76E-02 | 2,17E-02 | 5,18E-03 | -8,09E+00 | | | | | | | | | | |
| Non hazardous waste (NHWD) | kg | 1,43E+04 | 1,65E+04 | 1,15E+03 | 2,76E+01 | 9,03E+01 | 5,18E+01 | 4,55E+01 | -3,55E+03 | | | | | | | | | | |
| Radioactive waste (RWD) | kg | 4,42E+00 | 3,19E+00 | 2,76E-01 | 1,32E-01 | 5,85E-01 | 3,38E-01 | 2,37E-02 | -1,27E-01 | | | | | | | | | | |

| Calculation: | Analyse | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|------------|--|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Results: | Effectbeoordeling | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Product: | 100 m _Totaal spoorstaaf 100m type 54E1 (van project 26.20.00125 ProRail Spoorstaaf ketenanalyse) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Methode: | SBK Bepalingsmethode, dec 2019 (NMD 3.1) V3.04 / MKI-SBK single-score | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Indicator: | Weging | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Skip categories: | Met resultaat = 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Default units: | Ja | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sluit infrastructuurprocessen uit: | Nee | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sluit lange termijnmissies uit: | Ja | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sorted on item: | Effectcategorie | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sort order: | Oplopend | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Effectcategorie | Eenheid | Totaal | A1-A3 spoorstaaf 100m (ProRail Spoorstaaf) | A4 spoorstaaf 100m type 54E1 | A5 spoorstaaf 100m type 54E1 | B spoorstaaf 100m type 54E1 | C1 spoorstaaf 100m type 54E1 | C2 spoorstaaf 100m type 54E1 | D scenario 100% recycling spoorstaaf 100m | | | | | | | | | |
| MKI | Euro | € 1.304,56 | € 1.741,06 | € 131,65 | € 53,65 | € 76,78 | € 47,22 | € 8,25 | € -754,05 | | | | | | | | | |
| 1 abiotic depletion, non fuel (AD) | kg Sb eq | 1,29E-01 | 1,20E-01 | 2,42E-03 | 2,01E-03 | 1,95E-04 | 1,20E-04 | 1,97E-04 | 3,96E-03 | | | | | | | | | |
| 2 abiotic depletion, fuel (AD) | kg Sb eq | 6,62E+01 | 8,34E+01 | 9,11E+00 | 2,74E+00 | 3,99E+00 | 2,46E+00 | 5,18E-01 | -3,61E+01 | | | | | | | | | |
| 4 global warming (GWP) | kg CO2 eq | 8.904,41 | 1,21E+04 | 1,28E+03 | 4,01E+02 | 5,77E+02 | 3,55E+02 | 6,93E+01 | -5,92E+03 | | | | | | | | | |
| 5 ozone layer depletion (ODP) | kg CFC-11 eq | 9,80E-04 | 7,74E-04 | 2,34E-04 | 6,26E-05 | 1,05E-04 | 6,43E-05 | 1,29E-05 | -2,71E-04 | | | | | | | | | |
| 6 photochemical oxidation (POCP) | kg C2H4 | 7,79E+00 | 1,96E+01 | 6,57E-01 | 3,86E-01 | 5,84E-01 | 3,59E-01 | 4,11E-02 | -1,39E+01 | | | | | | | | | |
| 7 acidification (AP) | kg SO2 eq | 4,40E+01 | 5,26E+01 | 3,50E+00 | 2,73E+00 | 4,37E+00 | 2,69E+00 | 3,00E-01 | -2,22E+01 | | | | | | | | | |
| 8 eutrophication (EP) | kg PO4--- eq | 1,75E+01 | 1,69E+01 | 6,06E-01 | 5,69E-01 | 9,84E-01 | 6,05E-01 | 6,05E-02 | -2,25E+00 | | | | | | | | | |
| 9 human toxicity (HT) | kg 1,4-DB eq | 4,84E+03 | 7,66E+03 | 4,51E+02 | 1,71E+02 | 2,08E+02 | 1,28E+02 | 2,84E+01 | -3,80E+03 | | | | | | | | | |
| 10 Ecotoxicity, fresh water (FAETP) | kg 1,4-DB eq | 1,68E+02 | 9,93E+01 | 1,14E+01 | 2,34E+00 | 2,90E+00 | 1,78E+00 | 8,25E-01 | 4,91E+01 | | | | | | | | | |
| 12 Ecotoxicity, marine water (MAETP) | kg 1,4-DB eq | 3,83E+05 | 2,61E+05 | 4,26E+04 | 8,23E+03 | 9,77E+03 | 6,01E+03 | 2,94E+03 | 5,29E+04 | | | | | | | | | |
| 14 Ecotoxicity, terrestrial (TETP) | kg 1,4-DB eq | 3,56E+02 | 2,08E+01 | 1,28E+00 | 1,65E+00 | 3,44E-01 | 2,11E-01 | 9,79E-02 | 3,31E+02 | | | | | | | | | |
| PERT | MJ | 7,15E+03 | 6,23E+03 | 1,67E+02 | 8,92E+01 | 4,89E+01 | 3,00E+01 | 1,13E+01 | 5,72E+02 | | | | | | | | | |
| PENRT | MJ | 1,37E+05 | 1,44E+05 | 2,04E+04 | 5,89E+03 | 8,95E+03 | 5,50E+03 | 1,15E+03 | -4,80E+04 | | | | | | | | | |
| Water consumption (FW) | m3 | 1,09E+02 | 1,24E+02 | 3,10E+00 | 1,18E+00 | 1,16E+00 | 7,11E-01 | 2,04E-01 | -2,17E+01 | | | | | | | | | |
| Hazardous waste (HWD) | kg | 2,69E-01 | 1,04E+00 | 1,00E-02 | 2,25E-02 | 3,76E-03 | 2,31E-03 | 6,88E-04 | -8,09E-01 | | | | | | | | | |
| Non hazardous waste (NHWD) | kg | 2,03E+03 | 1,65E+03 | 6,38E+02 | 1,64E+01 | 9,03E+00 | 5,52E+00 | 6,59E+01 | -3,55E+02 | | | | | | | | | |
| Radioactive waste (RWD) | kg | 5,75E-01 | 3,19E-01 | 1,32E-01 | 3,46E-02 | 5,85E-02 | 3,60E-02 | 7,28E-03 | -1,27E-02 | | | | | | | | | |

