

2021 • 2022

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## Masterthesis

Stabiliteitstechnisch onderzoek naar een drainerend massief onder het treinspoor

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Ali PIRDAVANI

PROMOTOR :

ir. Wim MAEKELBERG

COPROMOTOR :

ir. Kurt SCHERPEREEL

Noah Schoenmakers, Ben Vanbergen

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



KU LEUVEN



KU LEUVEN

2021 • 2022

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## Masterthesis

Stabiliteitstechnisch onderzoek naar een drainerend massief onder het treinspoor

**PROMOTOR :**

Prof. dr. ir. Ali PIRDAVANI

**PROMOTOR :**

ir. Wim MAEKELBERG

**COPROMOTOR :**

ir. Kurt SCHERPEREEL

**Noah Schoenmakers, Ben Vanbergen**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde



**KU LEUVEN**



# Woord vooraf

Deze masterproef is een voltooiing van de vierjarige gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen bouwkunde aan de UHasselt en KU Leuven. De kennis, verworven tijdens onze studie, hebben we toegepast bij het uitwerken van deze scriptie. We hebben deze kennis op een creatieve manier toegepast om de proefopstellingen te bedenken, aangezien hier geen genormeerde proeven voor bestaan. Bovendien was dit een verrijking op vlak van kennis en ervaring die we in onze verdere carrière zullen meedragen.

We willen graag onze dank uitspreken naar volgende personen en bedrijven. Hun begeleiding was een grote meerwaarde bij het volbrengen van dit onderzoek. We bedanken de begeleiders van het bedrijf TUC RAIL n.v. Ir. Wim Maekelberg en Ir. Kurt Scherpereel voor hun ondersteuning en sturing tijdens dit onderzoek. Verder bedanken we TUC RAIL n.v. voor het aanbieden van dit onderwerp en voor het beschikbaar stellen van het nodige materiaal. Daarnaast willen we het bedrijf Baldewijns bedanken voor het leveren en beschikbaar stellen van aggregaat. Dit onderzoek was niet mogelijk geweest zonder het ACB<sup>2</sup> labo en hun medewerkers, wij danken hen voor de aangename samenwerking. Onze promotor van de UHasselt, Prof. Dr. Ir. Ali Pirdavani verdient zeker ook de nodige dank. Hij heeft veel bijgedragen aan de structuur en wetenschappelijke schrijfstijl van de scriptie.

Tot slot willen we onze families en partners bedanken voor het nalezen van de scriptie en de mentale steun. We gaan jullie constructieve kritiek en grenzeloos geduld nooit vergeten.



# Inhoudsopgave

Woord vooraf.....	1
Abstract.....	9
<b>1 Inleiding.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Literatuurstudie.....</b>	<b>13</b>
2.1 Bestaande drainage toepassingen .....	13
2.1.1 Voetbalterrein.....	13
2.1.2 Parkings.....	13
2.1.3 RailPipe-systeem.....	14
2.1.4 Infiltratiebuizen beton .....	15
2.1.5 Infiltratieput.....	16
2.1.6 Gracht .....	16
2.1.7 Infiltratiekratten.....	17
2.2 Noties van het bestaande spoorwegplatform.....	18
2.2.1 Huidige opbouw .....	18
2.2.2 Treinbelasting.....	19
2.3 Het concept van de drainerende bedding.....	20
2.3.1 Materiaal.....	20
2.3.2 Infiltratiecapaciteit.....	21
2.3.3 Buffercapaciteit .....	23
2.3.4 Stabiliteitstechnische aspecten bij spoorwegen.....	24
<b>3 Methode.....</b>	<b>27</b>
3.1 Belasting op drainerend massief.....	27
3.2 Dynamische belastingsproef.....	29
3.3 Proefbak.....	31
3.4 Korrelverdeling .....	32
3.5 Buffercapaciteit .....	33
<b>4 Resultaten belastingsproef.....</b>	<b>35</b>
4.1 Dataverwerking belastingsproef.....	35
4.2 Bespreking resultaten belastingsproef.....	35
<b>5 Resultaten korrelverdeling .....</b>	<b>41</b>
5.1 Dataverwerking korrelverdeling.....	41
5.2 Bespreking resultaten korrelverdeling.....	42
<b>6 Resultaten buffercapaciteit.....</b>	<b>45</b>
6.1 Dataverwerking buffercapaciteit .....	45
6.2 Bespreking resultaten buffercapaciteit .....	46

<b>7</b>	<b>Resultaten economische vergelijking.....</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>Besluit .....</b>	<b>51</b>
8.1	Conclusie .....	51
8.2	Kritische beschouwing .....	52
8.3	Toekomstig onderzoek .....	52
	<b>Referentielijst.....</b>	<b>53</b>
	<b>Bijlagen.....</b>	<b>55</b>

# Lijst van tabellen

Tabel 1: Infiltratiecapaciteit in functie van de grondsoort .....	22
Tabel 2: Karakteristieke eigenschappen gesteentes.....	24
Tabel 3: Lastendaling spooropbouw zonder veiligheidsfactor.....	28
Tabel 4: Berekening korrelverdeling ballast voor de belastingsproef.....	41
Tabel 5: Invulblad buffercapaciteit .....	45
Tabel 6: Resultaten buffercapaciteit.....	46
Tabel 7: Gemiddelde leegloopdebieten .....	46
Tabel 8: Economische vergelijking .....	49





# Lijst van figuren

Figuur 1: Opbouw voetbalveld.....	13
Figuur 2: Opbouw parking .....	14
Figuur 3: Frankische Railpipe-systeem .....	14
Figuur 4: Varianten Frankische drainagebuis.....	15
Figuur 5: Voorbeeld infiltratiebuis.....	15
Figuur 6: Foto infiltratieput.....	16
Figuur 7: Drainagegracht.....	17
Figuur 8: Varianten JobiCell infiltratiekragen .....	17
Figuur 9: Klassieke bedding.....	18
Figuur 10: Asfaltbedding.....	18
Figuur 11: Klassieke spooropbouw.....	19
Figuur 12: Laagopbouw met bufferende laag .....	20
Figuur 13: Aggregaat: ballast – betonpuin – grind.....	21
Figuur 14: Effectief buffervolume.....	23
Figuur 15: Interlocking geogrid .....	24
Figuur 16: Locatie geogrid.....	25
Figuur 17: Lastendaling doorheen de lagen (doorsnede) .....	27
Figuur 18: Oppervlaktes van de belastingspreiding (bovenaanzicht van 1 dwarsligger).....	27
Figuur 19: Proefopstelling.....	29
Figuur 20: Verplaatsingssensor .....	29
Figuur 21: Krachtsoverbrenging metalen platen .....	30
Figuur 22: Werkelijke belastingsimpuls.....	30
Figuur 23: Ideale belastingsimpuls.....	30
Figuur 24: 3D-model proefbak (links) en gerealiseerde proefbak (rechts) .....	31
Figuur 25: Zeeftoren.....	32
Figuur 26: Zeef met granulaat .....	32
Figuur 27: Waterstandmeter (links) - afvoerkraan (rechts).....	33
Figuur 28: Buffercapaciteit proefopstelling (concept en realiteit) .....	33
Figuur 29: Kracht-tijd grafiek betonpuin .....	36
Figuur 30: Kracht-tijd grafiek grind.....	36
Figuur 31: Kracht-tijd grafiek ballast.....	36
Figuur 32: Verplaatsing-tijd grafiek (alle materialen).....	37
Figuur 33: Verplaatsing-tijd grafiek (gekalibreerd na fase 1) .....	38
Figuur 34: Kracht-verplaatsing grafiek ballast.....	39
Figuur 35: Kracht-verplaatsing grafiek betonpuin .....	39
Figuur 36: Kracht-verplaatsing grafiek grind.....	39
Figuur 37: Verplaatsing - piekkracht.....	40
Figuur 38: Korrelverdeling ballast 32/50 .....	42
Figuur 39: Korrelverdeling grind 20/32 .....	42
Figuur 40: Korrelverdeling betonpuin 20/40.....	43
Figuur 41: Korrelverdeling - overzicht van de drie aggregaten na de belastingsproef .....	44



# Abstract

Deze masterproef onderzoekt de stabiliteit en buffercapaciteit van een drainerend massief onder het treinspoor, rekening houdend met circulariteit en duurzaamheid. Door de klimaatverandering is de luchttemperatuur hoger, waardoor de wateropslagcapaciteit van lucht stijgt. Gedurende de zomer resulteert dit in lange periodes van droogte afgewisseld met intense regenbuien. Om uitdroging van de grond en overstromingen te verminderen, is een drainerende laag onder treinsporen gewenst, zonder de stabiliteit in het gedrang te brengen.

Op basis van de korrelverdeling en circulariteit werden drie aggregaten in de drainerende laag getest, namelijk: ballast 32/50, grind 20/32 en betonpuin 20/40. De zetting van het materiaal werd bepaald tijdens een simulatie van een treinbelasting door middel van een hydraulische pers. Daarnaast is de buffercapaciteit van de aggregaten bepaald met behulp van een geijkt waterreservoir. Tot slot is de korrelverdeling voor en na de belastingsproeven getest om verbrijzeling te detecteren.

Betonpuin is niet geschikt als bufferende laag, want het verbrijzelt bij een treinbelasting van 50 kN/m<sup>2</sup>. Ballast en grind verbrijzelen niet onder treinbelasting. Ballast heeft de grootste buffercapaciteit, namelijk 391 l/m<sup>3</sup>. Een kostenraming voor een fictieve werf toont bovendien aan dat circulaire ballast 6 €/ton (41,4%) goedkoper is dan het beste alternatief. Hieruit wordt geconcludeerd dat circulaire ballast het meest geschikte aggregaat is voor een bufferende laag onder het treinspoor.

# Abstract

This master's thesis examines the stability and buffering capacity of a drainage layer underneath the railway. Due to climate change, the air temperature increases, which leads to an increase in the water storage capacity of air. This results in long periods of drought alternating with intense rainfall during summertime. A drainage layer is designed underneath the railroad to reduce soil dehydration and flooding without compromising stability. Moreover, circularity and sustainability of the drainage layer are taken in account.

Based on the grain distribution and circularity, three different aggregates in the drainage layer were tested, namely ballast 32/50, gravel 20/32 and concrete rubble 20/40. This test simulates a train load by means of a hydraulic press. In addition, the buffer capacity of the aggregates was determined using a calibrated water tank. Finally, the grain distribution before and after the tests was tested to detect crushing. The settlement of the material is determined during a simulation of a train load by means of a hydraulic press.

Concrete rubble is not suitable as a buffering layer, it shatters under a train load of 50 kN/m<sup>2</sup>. Ballast and gravel do not shatter under train loads. Ballast has a buffer capacity of 391 l/m<sup>3</sup>, the largest of the three materials. Cost estimation for a fictitious yard shows that circular ballast is 6 €/ton (41,4%) cheaper than the best alternative. As a result, it can be concluded that circular ballast is the most suitable aggregate for a buffering layer underneath the track.

# 1 Inleiding

De overstromingen in Wallonië tijdens de zomer van 2021 geven aanleiding tot intensiever onderzoek naar waterbeheer. Deze overstromingen zijn grotendeels te wijten aan de klimaatverandering waardoor de luchttemperatuur stijgt en als gevolg hiervan stijgt ook de wateropslagcapaciteit van lucht. Gedurende de zomer resulteert dit in lange droge periodes afgewisseld met intense regenbuien. Enkele negatieve gevolgen hiervan zijn:

- droogtemaatregelen
- bosbranden
- waterschaarste bij landbouw
- overbelasting van het rioleringsnetwerk
- overstromingen

De aanleg van verharde oppervlakken zoals spoorwegen, parkings, wegen en gebouwen versterkt deze negatieve gevolgen, doordat er onvoldoende hemelwater kan infiltreren. Tevens zorgt de grote hoeveelheid verharde oppervlakken voor veel waterafvoer naar bufferende rioleringsystemen, die sneller overbelast worden bij hevige regenval. Om deze problemen te verminderen, is onder begeleiding van TUC RAIL n.v. onderzoek gedaan naar de stabiliteit en buffercapaciteit van een drainerende laag onder het treinspoor. Hierdoor ontstaat een potentieel van 10 km<sup>2</sup> infiltratie oppervlak in België [1]. Dit is slechts een klein aandeel van de totale verharde grondoppervlakte in België (4600 km<sup>2</sup>), maar dit infiltrerend maken is een stap in de goede richting [2].

De drainerende bedding dient te voldoen aan volgende doelstellingen:

- Het concept dient zich in te passen in de omgeving. De drainerende bedding dient binnen de bestaande oppervlakte van de spoorinfrastructuur worden ingepast. Bijkomende onteigeningen zijn ongewenst.
- De stabiliteit van het spoorwegplatform moet steeds gegarandeerd blijven.
- De buffercapaciteit dient voldoende te zijn voor een buiduur van 48 u met 1,64 mm/u regenval.
- Onderhoud van de drainerende bedding dient beperkt te blijven.
- Het concept dient zich zo veel mogelijk in te passen in het verhaal van circulaire economie. Dit houdt in dat bij voorkeur gerecycleerde materialen gebruikt worden.
- De aanleg van de bedding moet financieel voordeliger en arbeidsexpansiever zijn dan de aanleg huidige bufferende afvoerriolering.

Het volgende hoofdstuk is de literatuurstudie, die bestaat uit drie paragrafen. In de eerste paragraaf zijn de bestaande drainagetoepassingen vergeleken. De belangrijkste voor- en nadelen van deze vergelijking worden bij het ontwerp van het drainerend massief in acht genomen. De hierop volgende paragraaf bespreekt de noties van het bestaande spoorwegplatform. Hierin wordt de laagopbouw en de treinbelasting behandeld. De derde paragraaf beschrijft het concept van de drainerende bedding.

In het derde hoofdstuk worden de methodes voor het testen van de aggregaten besproken. Bestaande uit een toelichting van de aangebrachte belastingen, verplaatsing, proefbak, korrelverdeling en buffercapaciteit. Vervolgens worden de dataverwerking en de analyse van de resultaten weergegeven voor elke proef. Daarna wordt de economische vergelijking verklaard. Tot slot wordt een conclusie gevormd.



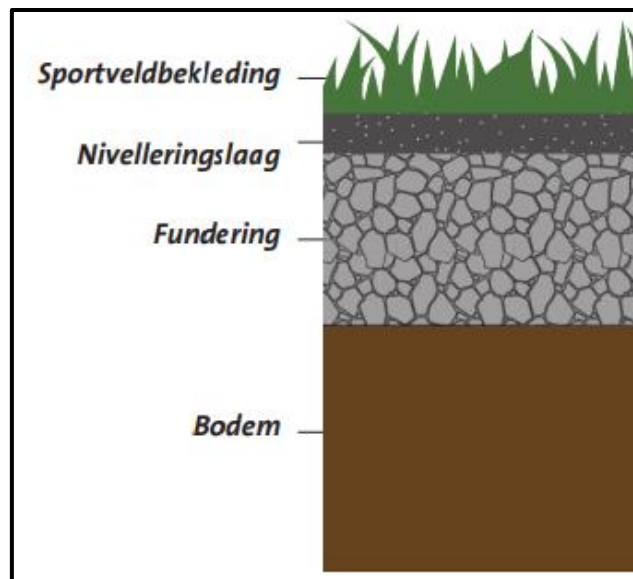
## 2 Literatuurstudie

### 2.1 Bestaande drainage toepassingen

#### 2.1.1 Voetbalterrein

Drainagesystemen worden ook toegepast in verschillende andere domeinen, zoals bijvoorbeeld bij voetbalterreinen. Holcim biedt verschillende oplossingen aan voor kunstgraspleinen [3]. Figuur 1 geeft weer hoe een drainagesysteem wordt toegepast onder een voetbalveld. In het Holcim-systeem wordt er gewerkt met verschillende lagen die op vollegrond worden aangezet.

- Laag 1: sportveldbekleding, kunstgras
- Laag 2: een waterdoorlatende nivelleringslaag die zorgt voor egaliteit en stabiliteit
- Laag 3: funderingslaag die bestaat uit gesteente 0/32 of 0/20, dewelke zorgt voor de draagkracht, infiltratie en buffering



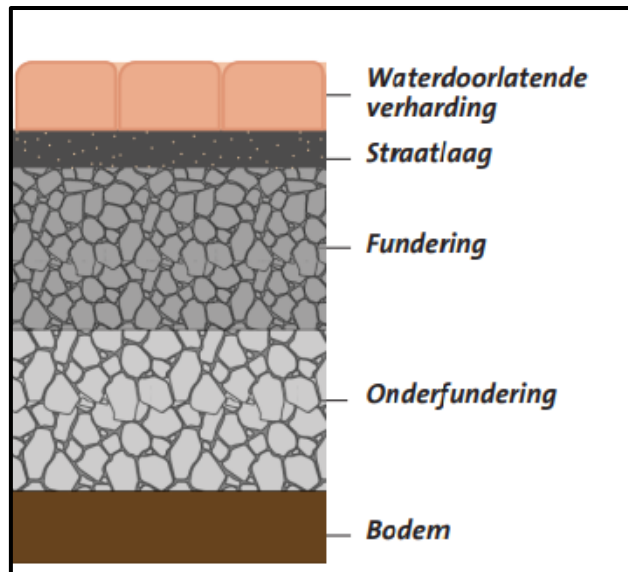
*Figuur 1: Opbouw voetbalveld [3, p. 2]*

#### 2.1.2 Parkings

Daarnaast heeft Holcim ook een drainagesysteem voor verhardingen zoals parkings en wegenissen, gedemonstreerd in Figuur 2 [3]. Hierbij is de laagopbouw uitgebreider omdat er zwaardere lasten aangrijpen op de laag. Er wordt gebruikgemaakt van vier lagen bovenop de ondergrond.

- Laag 1: waterdoorlatende verharding die zorgt voor een egaal oppervlak. Deze laag is niet noodzakelijk bij treininfrastructuur omdat er een ballastbed voorzien wordt.
- Laag 2: straatlaag met eenzelfde functie als de nivelleringslaag uit subparagraaf 2.1.1
- Laag 3+4: (onder)fundering bestaande uit twee dikke lagen. Deze zijn dikker dan onder het voetbalveld omdat er een grotere krachtsverdeling nodig is.





*Figuur 2: Opbouw parking [3, p. 2]*

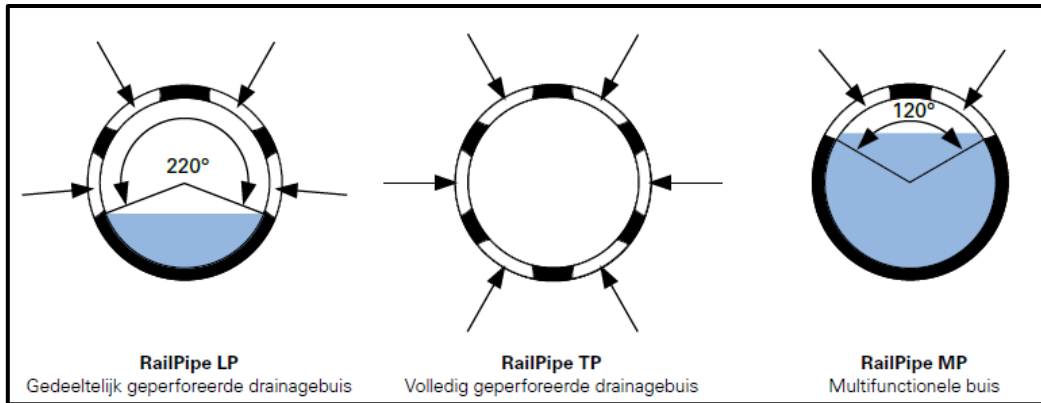
### 2.1.3 RailPipe-systeem

Het RailPipe-systeem bestaat uit een polypropyleen infiltratiebuis. Dit systeem voldoet aan de eisen van het Eisenbahn-Bundersamt (EBA), de federale overheidsinstantie voor de veiligheid van spoorwegen in Duitsland. Dit systeem wordt reeds frequent gebruikt in de Duitse spoorweginfrastructuur, gedemonstreerd in Figuur 3.



*Figuur 3: Frankische Railpipe-systeem [4, p. 2]*

Het Railpipe-systeem bestaat uit een verstevigde, dubbelwandige drainageleiding en bijhorende inspectieputten. Dit systeem is door zijn geoptimaliseerde profielgeometrie bestand tegen treinbelastingen en is bovendien 100% recycleerbaar. De leverancier, Frankische, heeft drie varianten van dit systeem. Deze drie varianten zijn weergegeven in Figuur 4 [4].



*Figuur 4: Varianten Franckische drainagebuis [4, p. 7]*

Het RailPipe TP-type is volledig geperforeerd en heeft de beste drainagecapaciteiten. Dit type is ontworpen om grondwater op te vangen en dan af te voeren. Wanneer de buis boven de grondwaterstand zonder helling wordt geïnstalleerd, kan deze ook werken als infiltratie-/buffersysteem.

Een nadeel van deze soort buizen is de kans op verstoppingen. Doorheen de tijd kunnen kleine zandpartikels en andere verontreinigingen de buis binnendringen en verstoppingen veroorzaken. Verstoppingen kunnen ervoor zorgen dat het hemelwater zich opbouwt onder het spoor, met als gevolg dat de infiltrerende functie wegvalt en er wateroverlast optreedt. Om verstopping te voorkomen moet er op regelmatige basis gecontroleerd worden wat de conditie van de buis is en moet er zo nodig onderhoud gebeuren. De controles worden uitgevoerd met behulp van een robot. Controles en onderhoud van het RailPipe-systeem zijn duur en tijdrovend aangezien het spoorwegennetwerk uit bijna 4 000 km spoorlijnen bestaat [5]. Deze methode zal niet verder onderzocht worden in deze thesis.

#### **2.1.4 Infiltratiebuizen beton**

Figuur 5 geeft een betonnen infiltratiebuis weer. Een infiltratiebuis is een poreuze buis die zowel het infiltreren, bufferen en afvoeren van hemelwater mogelijk maakt. In de volksmond zijn deze buizen zowel gekend onder de benaming infiltratiebuis als drainagebuis.

Dankzij de doorlatende betonnen wand van de drainagebuis kan het water geleidelijk de buis verlaten en de grond indringen [6]. Deze buis heeft hetzelfde nadeel als de RailPipe TP. Er is namelijk kans op verstoppingen en de controles hiervoor brengen een grote kost mee op lange termijn. Deze methode wordt ook niet onderzocht in deze thesis.



*Figuur 5: Voorbeeld infiltratiebuis [7]*

### 2.1.5 Infiltratieput

Een ander bestaand drainagesysteem is het gebruik van een ondergrondse infiltratieput (Figuur 6) voor het infiltreren van hemelwater. Het hemelwater wordt verzameld in een grote tank (2 000-10 000 liter) [8]. De infiltratieputten zijn rondom voorzien van gaten waardoor het water in de bodem kan infiltreren. Enkele voordelen van dit systeem zijn: de lage investeringskost en beperkt verlies van grondoppervlak.

De nadelen van dit systeem zijn: gebruik is enkel mogelijk bij lage grondwaterstanden, het kan slechts een beperkt oppervlak afwateren en het is moeilijk toepasbaar voor spoorwegen. Bijkomend kunnen ze geen grote belastingen opvangen met als gevolg dat ze niet onder het spoor geplaatst kunnen worden. In België is er geen ruimte beschikbaar om deze naast het spoor te plaatsen en het onteigenen van grond is duur. Deze methode is dus niet geschikt voor Belgische spoorwegen.



*Figuur 6: Foto infiltratieput [9]*

### 2.1.6 Gracht

Bij een systeem van infiltrerende grachten wordt het hemelwater volgens het principe van de waterverhanglijn naar de gracht gevoerd. Deze grachten kunnen naast een spoorweg aangelegd worden. In dergelijke grachten wordt het water gebufferd en kan het langzaam infiltreren in de bodem wanneer deze begint te drogen, zoals gedemonstreerd in Figuur 7.

De voordelen van deze methode zijn:

- goedkope aanlegprijs
- eenvoudige aanleg

De nadelen zijn:

- Ze nemen veel ruimte in beslag en deze ruimte is vaak niet beschikbaar langs spoorwegen. Het plaatsen van een gracht dicht bij een spoorweg kan nefast zijn voor de stabiliteit. Om deze reden worden de grachten op een zekere afstand van het spoor geplaatst.
- Het systeem heeft regelmatig onderhoud nodig zoals snoeien en vrijmaken van de oevers. Hierdoor wordt het systeem op lange termijn duurder.

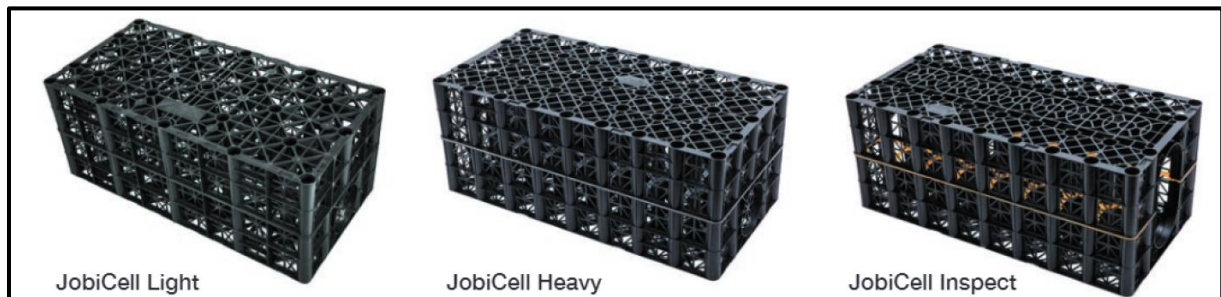
Omwille van bovenstaande nadelen kan dit systeem niet toegepast worden bij de Belgische spoorwegen. Deze methode wordt ook niet onderzocht in deze thesis.



*Figuur 7: Drainagegracht [10]*

### 2.1.7 Infiltratiekratten

Een ander bestaande drainagesysteem zijn de infiltratiekratten, een voorbeeld hiervan is de JobiCell infiltratiebox. Deze infiltratiebox is sterk waterdoorlatend en heeft een grote buffercapaciteit. Hemelwater wordt tijdelijk opgeslagen in de kratten om daarna geleidelijk te infiltreren in de bodem. JobiCell heeft drie types: Light, Heavy en Inspect, zie Figuur 8 [11].



*Figuur 8: Varianten JobiCell infiltratiekratten [11, p. 6]*

De JobiCell Light is speciaal ontwikkeld voor locaties zonder verkeersbelasting. Hierdoor is dit type niet geschikt voor dit onderzoek. Echter kan deze wel gebruikt worden langs het spoor onder het dienstpad als inlaatconstructie. De JobiCell Heavy is ontwikkeld voor zwaarbelaste toepassingen, zoals woningbouw, commerciële- en infrastructuurprojecten. Deze versie is voldoende draagkrachtig om gebruikt te worden in een drainerend massief. De JobiCell Inspect creëert een tunnel die toegang mogelijk maakt voor inspectie en onderhoud. Echter is dit laatste type minder draagkrachtig en niet geschikt als drainerende laag onder spoorwegen.

Enkele voordelen van de JobiCell zijn:

- de hoge bergingscapaciteit;
- snel te plaatsen;
- toepasbaar bij hoge en lage grondwaterstanden;
- Doordat infiltratiekratten over een groot oppervlak verdeeld kunnen worden, zijn controles op verstoppingen overbodig.

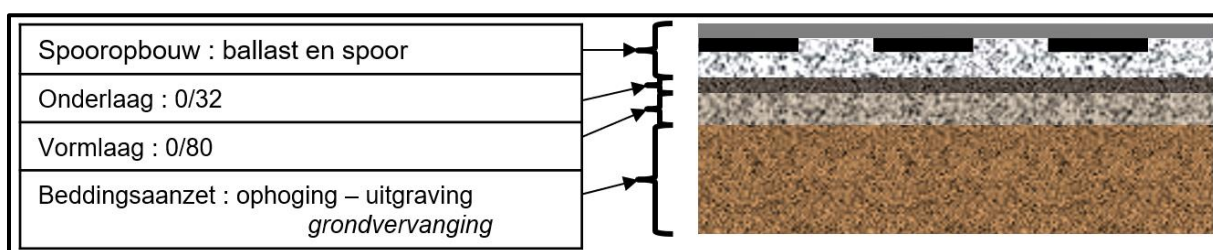
Aangezien het concept van de drainerende bedding eveneens moet passen in een verhaal van circulaire economie zal deze oplossing niet onderzocht worden in deze thesis.

## 2.2 Noties van het bestaande spoorwegplatform

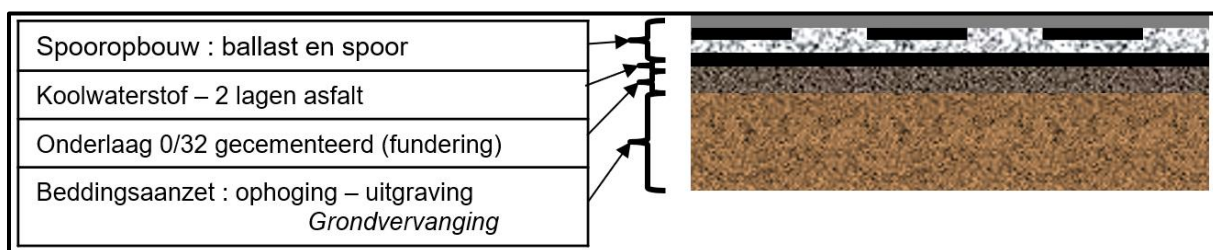
### 2.2.1 Huidige opbouw

De laagopbouw van een spoorweg is afhankelijk van de locatie. Niet enkel kan dit verschillen van land tot land, maar is dit ook afhankelijk van de ondergrond en omgeving. Zo zal een spoorweg in een stedelijke omgeving een andere opbouw hebben dan een spoorweg in een open veld. De inzichten in de opbouw van spoorweglagen zijn doorheen de tijd en met behulp van technologische evolutie geëvolueerd waardoor er momenteel verschillende treinspoorconfiguraties naast elkaar bestaan.

Voor de aanleg van nieuwe spoorbeddingen worden er in België momenteel twee verschillende types gebruikt. Enerzijds een klassieke bedding, weergegeven in Figuur 9. Anderzijds een asfaltbedding, weergegeven in Figuur 10 [12].

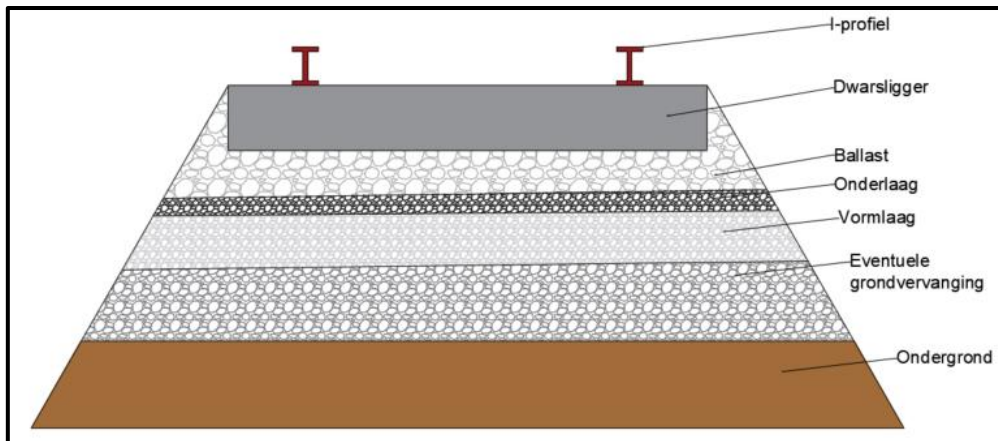


Figuur 9: Klassieke bedding [12, p. 5]



Figuur 10: Asfaltbedding [12, p. 5]

In deze thesis wordt er uitgegaan van een klassieke bedding. Deze opbouw is gedetailleerd weergegeven in Figuur 11. De veralgemeende klassieke laagopbouw ziet er uit als volgt. Bovenaan zijn de spoorrails zichtbaar met de dwarsliggers. Deze worden omringd door de ballastlaag, dewelke respectievelijk rust op de onderlaag en vormlaag van het spoor. De voorlaatste laag is de eventuele grondvervanging, deze wordt enkel geplaatst bij onvoldoende draagkrachtige grond. Tot slot ligt het geheel op de volle ondergrond. Al de steenslagmaterialen gebruikt in de opbouw van spoorwegen moeten voldoen aan de eigenschappen van de Technische Bepalingen L11 van Infrabel [13]. Deze materialen moeten afkomstig zijn van een door Infrabel erkende groeve.



Figuur 11: Klassieke spooropbouw

### 2.2.2 Treinbelasting

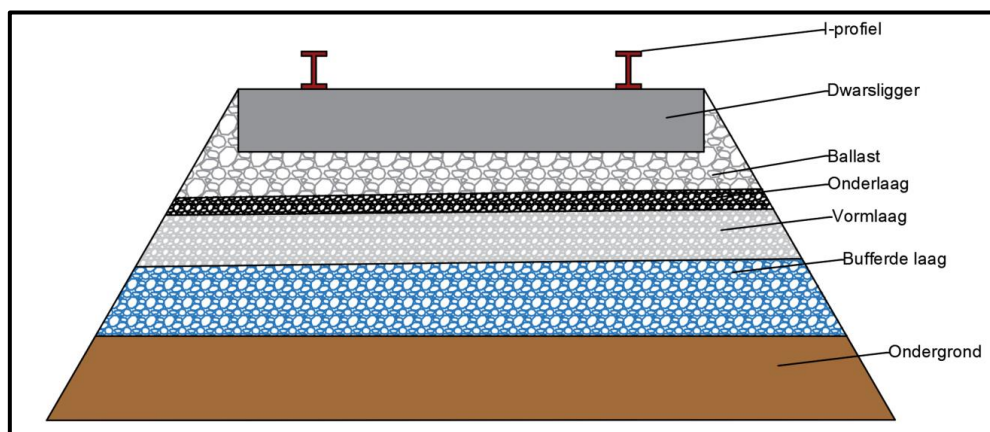
Een spoorbedding is zodanig opgebouwd dat de gehele treinbelasting wordt overgebracht naar de ondergrond. Bij de berekening van de treinbelasting per grondlaag dient telkens het eigengewicht van de bovenliggende grondlagen meegerekend te worden. De grootste spanning treedt op tussen het wiel en het spoor. Dit komt doordat het contactoppervlak hier het kleinste is ( $2 \text{ cm}^2$ ). Vervolgens worden het contactoppervlak en de kracht groter naargelang de diepte toeneemt. Hierbij neemt de oppervlakte sneller toe dan de kracht, wat resulteert in afnemende spanning. Hoe lager in de opbouw, hoe beter de treinbelasting verdeeld is [14].

Bijlage A geeft een overzicht van de verschillende treinkarakteristieken, waaronder de aslast voor de verschillende types van treinverkeer. Om de treinbelastingen per grondlaag te berekenen dient de aslast gekend te zijn. In deze scriptie wordt de berekening gemaakt voor gemengd treinverkeer. De bijhorende aslast bedraagt  $225 \text{ kN}$  [14].

## 2.3 Het concept van de drainerende bedding

Deze masterproef onderzoekt een alternatief voor de klassieke afvoeriolering bij treinsporen. Dit alternatief bestaat uit een drainagelaag die het hemelwater lokaal buffert en infiltreert. In paragraaf 2.1 zijn reeds bestaande drainagetoepassingen besproken, deze toepassingen zijn echter niet altijd geschikt. Dit omwille van hoge onderhoudskosten, hoge aanlegkosten, beperkte oppervlaktes en het niet-circulaire gebruik van materialen. Daarom wordt er geopteerd een andere methode toe te passen.

De oplossing bestaat uit een bufferend massief welke de eventuele grondvervangende laag uit Figuur 11 vervangt. De bufferende laag, weergegeven in Figuur 12, heeft een infiltrerende functie zolang de grond niet verzadigd is. De laag krijgt een bufferende functie wanneer de grond verzadigd is of wanneer het regendebiet hoger is dan het infiltratiedebiet. Het drainerend massief bestaat uit een aggregaatlaag onderaan in de spooropbouw. In deze laag kan het water tijdelijk gebufferd worden en daarna infiltreren in de bodem. De voorgestelde oplossing moet steeds stabiel en bufferend blijven gedurende de levensduur van de spoorweg. Er wordt bijkomend geëist dat de aggregaatlaag niet te veel onderhoud mag vergen en moet passen in het verhaal van circulaire economie.



Figuur 12: Laagopbouw met bufferende laag

Voordat het water geïnfilteerd kan worden, dient het te worden gereinigd. Het reinigingsproces ligt buiten de scope van dit onderzoek. In dit onderzoek wordt er dus vanuit gegaan dat het water reeds gereinigd is wanneer het terechtkomt in het drainerend massief. Deze studie zal zich toespitsen op de stabiliteit en buffercapaciteit van dit drainerend massief.

### 2.3.1 Materiaal

Een aggregaatbuffer is een laag gesteente die het hemelwater gedurende een bepaalde periode kan bufferen in de holtes tussen de stenen. Het water in de aggregaatbuffer infiltreert geleidelijk in de grond. Voor dit onderzoek zijn drie verschillende aggregaatsoorten gekozen op basis van hun herkomst en korrelverdeling.

Voor het drainerend massief worden drie aggregaattypes getest, weergegeven Figuur 13:

- herwonnen ballast 32/50
- betonpuin 20/40
- grind 20/32



*Figuur 13: Aggregaat: ballast – betonpuin – grind [15]*

Ballast is een materiaal dat herwonnen wordt tijdens de afbraak van de bovenste laag van bestaande spoorwegen. Dit kan hergebruikt worden in het drainerend massief, wat leidt tot een grote kostenbesparing en kleinere ecologische voetafdruk. Dit past in het verhaal van circulaire economie.

Vervolgens wordt het gebruik van betonpuin onderzocht. Betonpuin is een gerecycleerd materiaal en klopt dus ook in het circulair verhaal. Dit materiaal kan herwonnen worden uit gebouwen en wegen. Het materiaal wordt grotendeels vrijgemaakt van organische stoffen en andere verontreinigingen. Bijlage B toont de grenswaarden van de hoeveelheid toegelaten verontreiniging. Bovendien is het goedkoper dan nieuwe aggregaten uit steengroeven aan te kopen en te transporteren.

Het derde en laatste materiaal is grind, in dit onderzoek is niet-gerecycleerde grind gebruikt. Dit materiaal is gekozen op basis van de korrelverdeling (20/32). Deze korrelverdeling is een courant gebruikte verdeling binnen de bestaande drainagetoepassingen. Grind bestaat uit een kleinere fractie dan de bovengenoemde gesteentes. De invloed hiervan dient onderzocht te worden bij de proeven.

### **2.3.2 Infiltratiecapaciteit**

Infiltratie van hemelwater kan gebeuren op drie manieren:

- Bovengrondse infiltratie: het water wordt op straatniveau afgevoerd naar een verlaagde grasstrook of gracht. De drainagegracht besproken in subparagraaf 2.1.6 is hier een voorbeeld van.
- Ondergrondse infiltratie: een methode waarbij, eventueel met behulp van een leiding, water in een ondergrondse laag komt. Het water zal hier tijdelijk opgeslagen worden en vervolgens in de bodem infiltreren. Voorbeelden van ondergrondse infiltratie zijn: het RailPipe-systeem, infiltratiebuizen, infiltratieputten en infiltratiekratten. Dit is weergegeven in subparagrafen 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5 en 2.1.7.
- Gemengde infiltratie: hier wordt gewerkt met doorlatende lagen waardoor rechtstreekse infiltratie in één verticale lijn naar de bodem mogelijk is. Voorbeelden van gemengde infiltratie zijn drainerende sportvelden en parkings, besproken in subparagrafen 2.1.1 en 2.1.2.

De drainerende laag, onderzocht in deze scriptie, werkt volgens het principe van gemengde infiltratie. De dikte van deze laag is afhankelijk van drie parameters:

- de stabiliteit van het aggregaat;
- de vereiste buffercapaciteit;
- de infiltratiegevoeligheid van de bodem.

De infiltratiegevoeligheid is afhankelijk van twee factoren, namelijk: de infiltratiecapaciteit (doorlaatbaarheid) van de bodem en het niveau van de grondwatertafel. Met een bodemonderzoek kunnen deze waarden bepaald worden. Wat betreft het grondwaterniveau moet er rekening gehouden worden met de seizoenschommelingen van de grondwatertafel.



Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende grondsoorten en hun bijhorende infiltratiecapaciteiten. In deze tabel is zichtbaar dat zandgronden een betere infiltratiecapaciteit hebben dan leemgronden. De keuze van buffering of infiltratie hangt dus van de bodem af.

Tabel 1: Infiltratiecapaciteit in functie van de grondsoort [16, p. 15]

Grondsoort	Infiltratiecapaciteit in mm/h				
	m/s	m/dag	mm/h l/h/m <sup>2</sup>	mm/dag l/dag/m <sup>2</sup>	l/h/100m <sup>2</sup>
<b>Grof zand</b>	1,5 10 <sup>-4</sup>	12	500	12 000	50 000
<b>Fijn zand</b>	5,6 10 <sup>-6</sup>	0,48	20	480	2 000
<b>Leemachtig fijn zand</b>	3,1 10 <sup>-6</sup>	0,26	11	260	1 100
<b>Lichte zavel</b>	2,8 10 <sup>-6</sup>	0,24	10	240	1 000
<b>Löss</b>	1,7 10 <sup>-6</sup>	0,14	6	140	600
<b>Veen</b>	6,1 10 <sup>-7</sup>	0,053	2,2	53	220
<b>Leem</b>	5,8 10 <sup>-7</sup>	0,050	2,1	50	210
<b>Lichte klei</b>	4,2 10 <sup>-7</sup>	0,036	1,5	36	150
<b>Matig zware klei</b>	1,4 10 <sup>-7</sup>	0,012	0,5	12	50
<b>Kleiige leem</b>	1,1 10 <sup>-7</sup>	0,0096	0,4	9,6	40

De neerslaghoeveelheid kan uitgedrukt worden in bui-intensiteiten met een zekere retourperiode. Hiermee worden de afwateringssystemen gedimensioneerd. De neerslag heeft tijd nodig om te infiltreren in de bodem en dient lokaal gebufferd te worden.

In deze masterproef worden volgende aannames gemaakt voor het infiltreren van het hemelwater:

- Grove zandbodems tot en met lichte kleibodems met een infiltratiecapaciteit groter dan of gelijk aan 1,5 mm/u worden als drainerend beschouwd.
  - Een drainerend massief kan hier toegepast worden.
  - Een neerslagintensiteit van minder dan 1,5 mm/u wordt direct geïnfiltreerd in een onverzadigde bodem.
- Grondsoorten met een infiltratiecapaciteit lager dan 1,5 mm/u worden als niet-drainerend beschouwd.
  - Hier is een drainerend massief minder geschikt. Er zal gemiddeld gezien meer regen vallen dan er geïnfiltreerd kan worden. Hierdoor zal de bufferende laag niet leeg zijn voordat de volgende bui valt. Bij deze grondsoorten is het aangeraden om een bufferende afvoerriolering te voorzien.

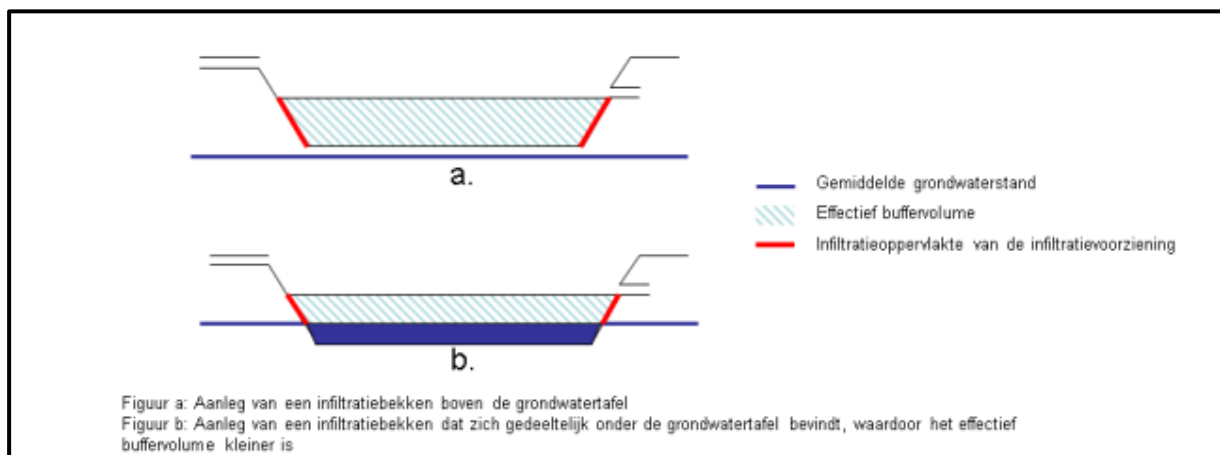
Eén keer per 20 jaar valt er gemiddeld gezien een bui met een intensiteit van 1,64 mm/u/m<sup>2</sup> met een buiduur van 48 u [16]. Wanneer er uit gegaan wordt van een verzadigde bodem tijdens deze bui, kan de buiduur vermenigvuldigd worden met de neerslagintensiteit. Dit leidt tot een vereiste buffercapaciteit van 78,72 mm/m<sup>2</sup>. Indien dit omgerekend wordt naar een volume per oppervlakte bedraagt dit 0,079 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. In deze masterproef wordt gewerkt met een veiligheidsfactor van 1,25 voor de vereiste buffercapaciteit. Dit resulteert in een buffercapaciteit van 0,1 m<sup>3</sup> water per vierkante meter.

### 2.3.3 Buffercapaciteit

De buffercapaciteit van de aggregaatbuffer, wordt bepaald door het aantal holtes en de grootte van de holtes die aanwezig zijn in de laag. Dit is afhankelijk van:

- de oppervlakte van de aggregaatbuffer. Aangezien onteigeningen zeer duur zijn wordt geopteerd om het oppervlak te beperken tot de oppervlakte van de spoorbedding.
- de dikte van de aggregaatbuffer;
- het type materiaal met bijhorende korrelverdeling.

Het effectief buffervolume neemt af in functie van een stijgend grondwaterpeil. Indien de grondwatertafel hoger ligt dan de onderkant van het drainerend massief zal het bufferreservoir zich vullen met grondwater. Wanneer de bufferlaag volledig verzadigd is, blijft er geen capaciteit over om het hemelwater te bufferen. In dit geval is afvoer van hemelwater noodzakelijk. Het effectief buffervolume wordt in onderstaande Figuur 14 geschetst voor een gracht. De werking is identiek voor een ondergronds drainerend massief bestaande uit aggregaat. In deze masterproef zal gewerkt worden met een nodige buffercapaciteit van  $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , zie subparagraaf 2.3.2 voor de berekening.



Figuur 14: Effectief buffervolume [16, p. 20]

### 2.3.4 Stabiliteitstechnische aspecten bij spoorwegen

Het concept van het drainerend massief moet stabiliteitstechnisch voldoen. Dit betekent dat er vanaf de ingebruikname van het spoor geen zettingen meer mogen optreden. Bovendien mag er geen verbrijzeling optreden, want dan neemt de bufferende werking af. Daarom wordt er onderzoek gedaan naar de verplaatsing en korrelverdeling bij een treinbelasting.

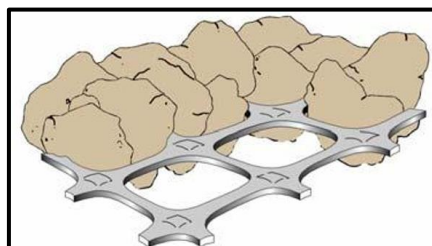
Zoals reeds vermeld worden er drie types gesteente onderzocht, zijnde ballast, betonpuin en grind. De stabiliteit van een drainerend massief is afhankelijk van verschillende parameters die verschillen per type gesteente. In de Tabel 2 worden de parameters en bijhorende waarden voor de drie aggregaten weergegeven. De belangrijkste parameters uit deze tabel zijn de weerstand tegen verbrijzeling weergegeven door de Los Angeles-waarde (LA) en de weerstand tegen afslijting weergegeven door de micro Deval-waarde (mDE). Hoe lager deze waardes zijn, hoe beter de weerstand is.

Tabel 2: Karakteristieke eigenschappen gesteentes [13, p. 15]

	<b>Ballast 32/50</b>	<b>Betonpuin 20/40</b>	<b>Grind 20/32</b>
(Type)	IA	E4	IB
Vorm – vlakheidsindex	≤ 15	/	≤ 15
Verontreiging [%]	0	<13	0
Fijne deeltjes [%]	0,4	/	0,7
Intrinsieke karakteristieken			
Weerstand tegen verbrijzeling (LA) [m%]	≤ 12	≤ 30	≤ 16
Weerstand tegen afslijting (mDE) [m%]	≤ 7	≤ 19	≤ 11

Deze waarden zijn van belang voor de stabiliteit. De korrelverdeling is belangrijk bij het verdelen van de spanningen van één steen naar de omliggende stenen. De vorm van een steen is hierbij ook van belang. Ronde stenen hebben een gladder oppervlak, waardoor ze sneller van elkaar zullen afschuiven. Daarentegen hebben hoekige stenen vaak een ruwer oppervlak wat leidt tot een grotere wrijvingscoëfficiënt. De hoekige stenen hebben maken gebruik van interlocking, wat zorgt voor meer stabiliteit, terwijl ronde stenen dit niet hebben. Echter zullen er in de randen van een hoekige steen grote spanningen optreden, met als gevolg dat ze meer kans hebben op barsten. Ronde stenen gaan daarentegen de spanningen meer verspreiden en dus minder snel barsten. De weerstand tegen verbrijzeling en afslijting is voornamelijk van belang bij de hoge belastingen. Indien een steen snel verbrijzelt, zullen er grotere zettingen optreden en zullen holtes snel gevuld geraken met gruis, wat nefast is voor de buffercapaciteit. Om de stabiliteit van de verschillende gesteentes te vergelijken is een dynamische belastingsproef vereist, dit wordt verder toegelicht in paragraaf 3.2.

Om de stabiliteit van het drainerende massief in de spoorbedding te verbeteren, bestaan er oplossingen in verschillende vakgebieden. Zo wordt er reeds gewerkt met geogrids in wegenbouw en spoorwegen. Een geogrid is een geosynthetisch materiaal dat wordt gebruikt om grond en soortgelijke materialen te versterken. Grond kan geen trekspanning opnemen en heeft de neiging om onder invloed van belasting en gebrek aan zijdelingse steun lateraal te vervormen. Geogrids kunnen deze trekkrachten opnemen en door middel van interlocking laterale vervorming tegengaan. Bij interlocking gaan aggregaten zich vastgrijpen in de mazen van het geogrid, met als gevolg dat ze minder kunnen bewegen en hun krachten kunnen overbrengen via het geogrid. Onderstaande Figuur 15 toont aan hoe dit gebeurt. De keuze van het type geogrid dient aangepast te zijn aan het type aggregaat.



Figuur 15: Interlocking geogrid [17, p. 90]

Uit een studie over geogrids in flexibele bestrating [18] blijkt dat de samenstelling van de verhardingsstructuur en de laagdikte van zeer groot belang zijn voor de prestaties en spanningsverdeling in de bestrating. Geogrids zijn effectief in het verminderen van de spanningen en horizontale afschuiving in de aggregaatlaag. Geogrids zijn functioneel bij laagdiktes van 203 tot 457 mm [18]. Daarnaast wordt dezelfde werking verwacht voor grotere basisdiktes wanneer een dunnere HMA (hot-mix asfalt) laag wordt gebruikt.

Figuur 16 geeft de optimale geogrid locatie weer. In een dunne aggregaatlaag is de optimale locatie ter hoogte van de scheiding tussen het ongebonden aggregaat en de ondergrond. De optimale plaats voor een enkele geogrid in een dikkere basislaag is in het bovenste derde deel van die laag. Een extra geogrid kan toegevoegd worden aan het raakvlak tussen de ondergrond en de basis van de laag om de stabiliteit verder te vergroten [18].



*Figuur 16: Locatie geogrid [19]*

Een tweede methode om de stabiliteit van lagen te verhogen, is het vermengen van verstijvende toeslagstoffen met de aggregaten. Dit principe wordt vaak gebruikt bij wegenwerken, maar zal geen meerwaarde bieden bij het drainerend massief. De gebruikte aggregaten hebben namelijk een ruwe korrelverdeling met veel holtes, waardoor de toeslagstof geen effectieve werking heeft en kan het de materialen niet onderling verbinden. Bij wegenwerken is het wel toepasbaar, aangezien de onderlagen een goed gespreide korrelverdeling hebben. De toeslagstoffen bestaan voornamelijk uit cement of kalk. De toeslagstoffen creëren een stijve laag met een opgevulde holtestructuur. Hierdoor neemt de stabiliteit aanzienlijk toe, maar de buffercapaciteit neemt significant af. Bovenstaand vermelde technieken, geogrids en vermenging, zullen niet getest worden binnen dit onderzoek. Er zijn enkel testen uitgevoerd op zuivere gesteentelagen [20].

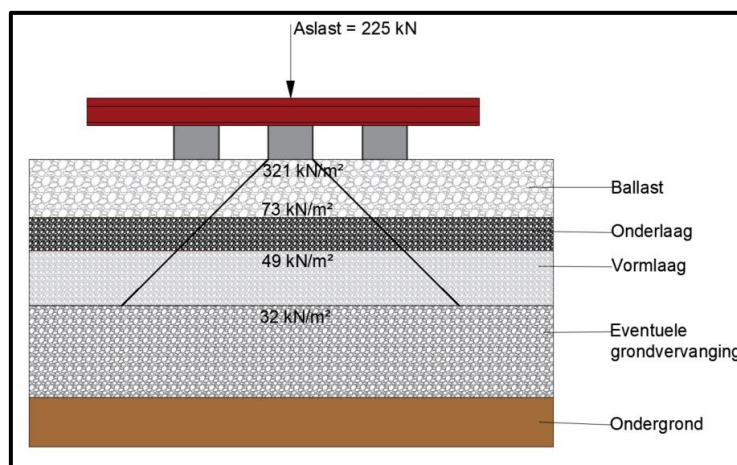


### 3 Methode

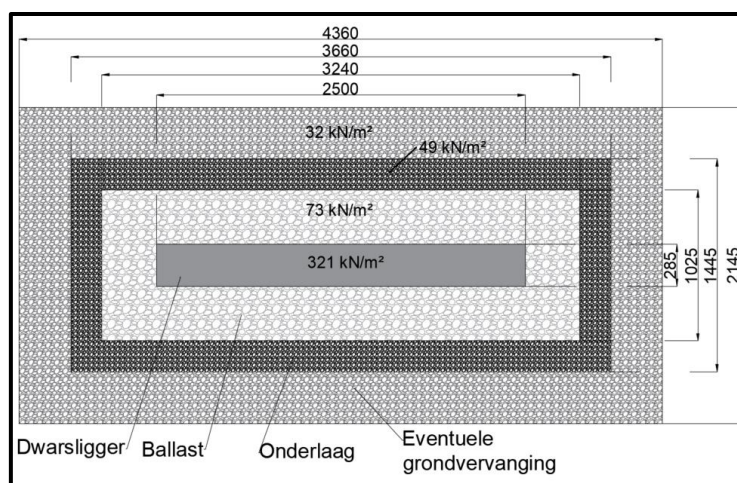
In dit hoofdstuk volgt een toelichting van de methodes die gebruikt zijn om het concept van de bufferende laag aan de praktijk te toetsen. Er wordt een proefopstelling op schaal gemaakt om de verplaatsing, korrelverdeling en buffercapaciteit te testen. Om de gesimuleerde belasting op materialen nauw bij de realiteit te laten aansluiten, is het noodzakelijk een berekening te maken van de vereiste druk. Dit wordt uitgebreid besproken in paragraaf 3.1. Eenmaal de belasting gekend is, wordt in de volgende paragraaf de dynamische belastingsproef besproken. In paragraaf 3.3 wordt de proefbak die gebruikt is bij de belastingsproef toegelicht. Daaropvolgend worden respectievelijk het proefopzet van de korrelverdeling en de buffercapaciteit besproken.

#### 3.1 Belasting op drainerend massief

Bij gemengd treinverkeer wordt gerekend met een aslast van 225 kN, zoals beschreven in subparagraaf 2.2.2. De aslast wordt afgedragen doorheen de verschillende lagen van de spooropbouw, weergegeven in Figuur 17. Het overdragen van de belasting is gebaseerd op een laagsgewijze reductie van spanningen door de 3-dimensionale spreiding van de lasten. Hoe lager in de opbouw, hoe groter het oppervlak waarover de kracht verspreid wordt, zoals weergegeven in Figuur 18. In elke laag is er een grotere spanning bovenaan dan onderaan. De treinbelasting wordt verdeeld over de onderliggende lagen met een spreidingshoek van 45°, de inwendige wrijvingshoek van het materiaal. Deze waarde is een gemiddelde waarde die gehanteerd wordt binnen de grondmechanica [21].



Figuur 17: Lastendaling doorheen de lagen (doorsnede)



Figuur 18: Oppervlaktes van de belastingspreiding (bovenaanzicht van 1 dwarsligger)

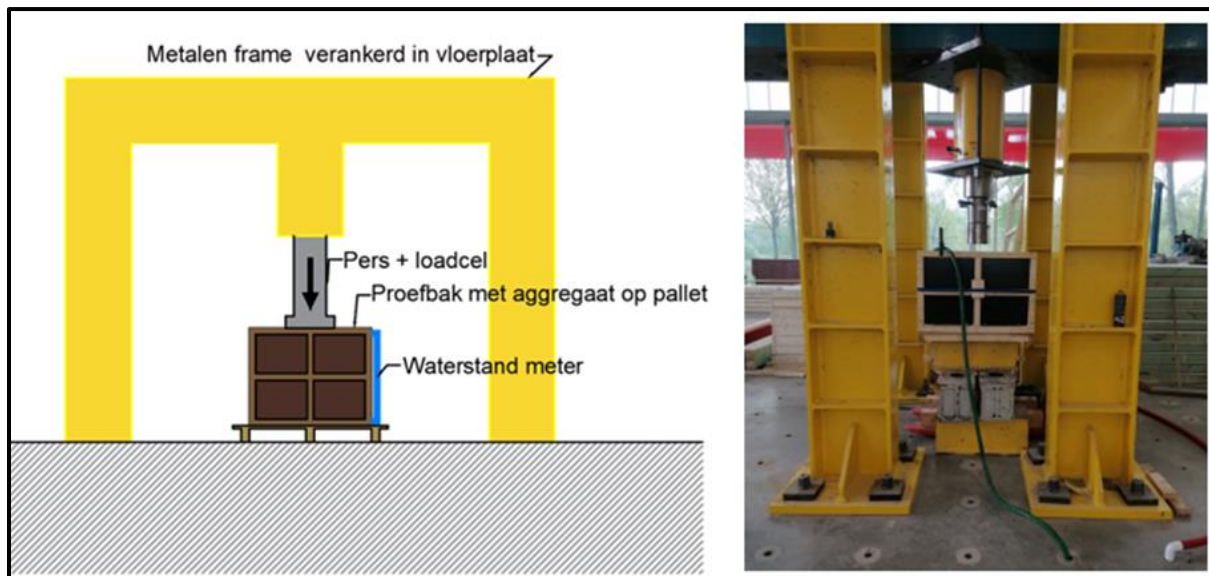
In Tabel 3 worden de berekende belastingen en spanningen onderaan elke laag weergegeven. De weergegeven belastingen nemen steeds het eigengewicht van elke laag mee in rekening aan de hand van hun volume en massadichtheid. De spanning op de rail en dwarsligger zijn niet berekend, omdat deze zich herverdelen onderaan de dwarsligger. In deze masterproef wordt er uit gegaan van een uniforme belasting onderaan de dwarsligger. Na de lastendaling geeft dit een spanning van 32 kN/m<sup>2</sup> onderaan de vormlaag. Dit is tevens de belasting die aangrijpt op de het drainerend massief dat onder de vormlaag is gelegen. Op deze waarde wordt een veiligheidsfactor voorzien die leidt tot een spanning van 50 kN/m<sup>2</sup>. Deze spanning wordt later in dit onderzoek gebruikt tijdens proeven om de reactie van verschillende materialen te vergelijken.

*Tabel 3: Lastendaling spooropbouw zonder veiligheidsfactor*

	<b>Belasting [kN]</b>	<b>Oppervlakte [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Spanning [kN/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Aslast</b>	225,00	/	/
<b>Rail</b>	225,72	/	/
<b>Dwarsligger</b>	228,82	0,71	321,16
<b>Ballast (37 cm)</b>	242,38	3,32	72,99
<b>Onderlaag (21 cm)</b>	257,14	5,29	48,62
<b>Vormlaag (35 cm)</b>	299,51	9,35	32,03

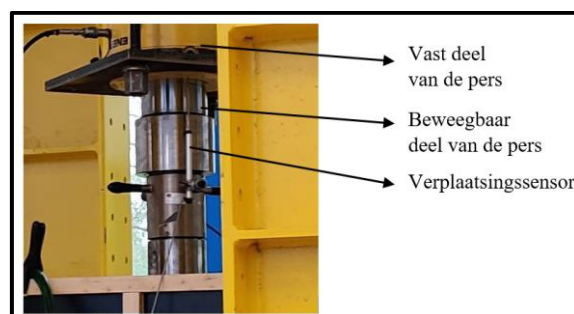
## 3.2 Dynamische belastingsproef

Gelijkaardig aan het onderzoek van Murad Y. Abu-Farsakh en Qiming Chen wordt de belastingsproef gebruikt om de zettingen en stabiliteit van de materialen te testen [22]. Om de effecten op lange termijn te simuleren is er voor een dynamische belastingsproef gekozen. Voor deze opstelling is gebruik gemaakt van een metalen frame waar de drukpers aan bevestigd is, zoals weergegeven in Figuur 19. Volgens het principe van actie-reactie geldt dat bij een drukbelasting op een materiaal er altijd een even grote tegengestelde kracht plaatsvindt. Het frame dient daarom stevig verankerd te zijn aan de grond. Dit wordt bereikt door ijzeren staven door de 70 cm dikke vloer te steken en vast te schroeven.



Figuur 19: Proefopstelling

De pers heeft een totale belastingcapaciteit van 500 ton waarvan in deze proef slechts een kleine fractie gebruikt wordt. De hydraulische cilinder functioneert op basis van een oliedruk die wordt gecreëerd door een pomp. Deze cilinder wordt manueel bediend en werkt minder precies dan een automatisch gestuurde pers. De pers kan zich in totaal 30 cm in de verticale richting verplaatsen ten opzichte van zijn nulpunt. Het is dus belangrijk om het proefstuk reeds van het begin op een berekenende hoogte te plaatsen. In deze opstelling is er gekozen om een afstand van ongeveer 15 cm te voorzien tussen de onderkant van de pers en de bovenkant van het proefstuk. Op die manier kan er 15 cm zetting plaatsvinden. Nadat de pers is opgesteld wordt de verplaatsingssensor geplaatst. Die bestaat uit een beweegbare staaf en een vast voetstuk, zoals weergegeven in Figuur 20. Het voetstuk wordt vastgeklemd op het bewegende stuk van de pers. De staaf is voorzien van een veer waardoor deze zichzelf altijd uitduwt tot tegen een oppervlak, tenzij de maximale lengte is bereikt. Deze staaf wordt tot tegen het vaste deel van de pers geplaatst. Zodoende meet de staaf een toename in afstand naargelang de pers zakt. De sensor wordt gekalibreerd zodat er met een nulwaarde wordt gestart.



Figuur 20: Verplaatsingssensor



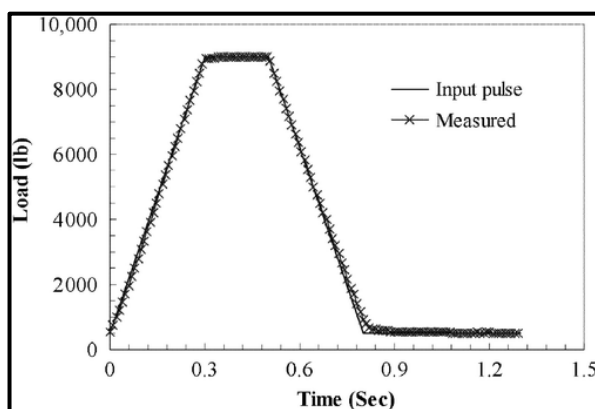
De kracht van de pers wordt door middel van twee gestapelde ijzeren platen overgebracht naar het materiaal, weergegeven in Figuur 21. Deze plaatcombinatie heeft een oppervlakte van 0,56 m<sup>2</sup>, een totale dikte van 5 cm en een gezamenlijk massa van 115 kg (gewicht = 1128 N). De vereiste belasting van 50 kN/m<sup>2</sup>, aangebracht op de oppervlakte van 0,56 m<sup>2</sup>, resulteert in een drukkracht van 28 kN. De drukkracht mag in vermindering worden gebracht met het gewicht van de platen. Dit zorgt ervoor dat er slechts 26,7 kN door de pers moet geleverd worden. Gemakkelijkheidshalve zal er gewerkt worden met een belasting van 30 kN, aangezien de pers moeilijk exact te bedienen is.



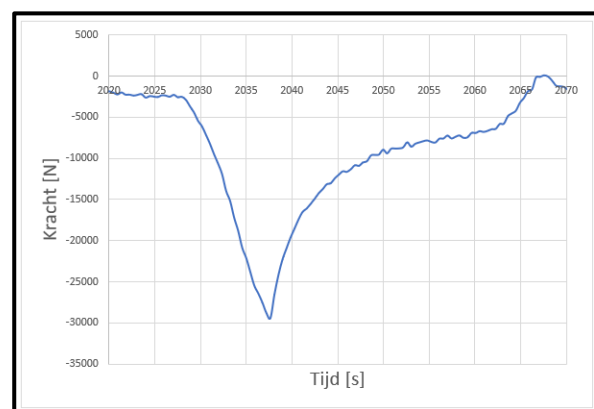
Figuur 21: Krachtsoverbrenging metalen platen

Tijdens het uitvoeren van de proeven wordt er gewerkt met drie fases: de verdichtingsfase en twee belastingsfases. Na elke fase, wordt de buffercapaciteit van het aggregaat gemeten. Fase 1 bestaat uit het 10 cycli voorbelasting aan 20% treinbelasting. Na fase 1 zal het aggregaat in de bak nog twee belastingsfases doorlopen van telkens 50 cycli aan 30 kN. De verplaatsing en buffercapaciteit van de drie materialen wordt vergeleken na 100 cycli.

De vorm van de cyclische belastingsimpuls, zoals weergegeven in Figuur 23, is de ideale belastingscurve wanneer de weergegeven waarden niet mee in rekening worden gebracht. Het is echter niet mogelijk om deze belastingsimpuls perfect te recreëren tijdens de proeven. De pers is manueel bediend en kan geen constante kracht aanhouden waardoor er pieken ontstaan in de metingen. Dit resulteert in een belastingsimpuls zoals weergegeven in Figuur 22. De grafiek van de effectieve aangebrachte belasting is gespiegeld om de x-as doordat de gemeten kracht negatief is.



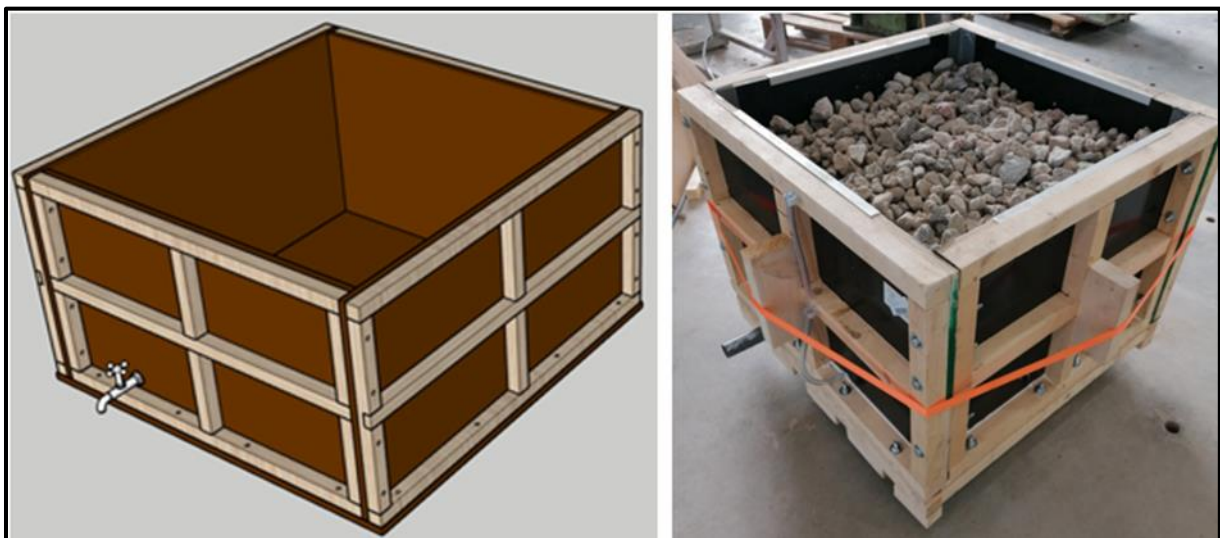
Figuur 23: Ideale belastingsimpuls [22, p. 276]



Figuur 22: Werkelijke belastingsimpuls

### 3.3 Proefbak

Aangezien de testen worden uitgevoerd op losse aggregaten zonder bindmiddel, is het noodzakelijk om een proefbak te voorzien die de aggregaten samenhoudt. Bij drukproeven op beton is dit bijvoorbeeld niet nodig, omdat het van zichzelf voor een samenhang zorgt. De eerste stap is een materiaalkeuze maken en de afmetingen van de proefbak vastleggen. De twee meest voor de hand liggende materialen zijn hout en staal, andere opties zoals beton en plastic zijn minder van toepassing. Een betonnen bak zou zwaar zijn en vereist veel wapening om de trekkrachten in de wanden op te vangen. Een plastic bak is niet geschikt voor grote spatkrachten op de wand. Het gebruik van een stalen bak lijkt in eerste instantie een veelbelovende keuze, dit door de hoge sterkte van staal en de goede bewerkbaarheid. Echter liggen de kosten van staal en een lasser buiten het budget. Daarom wordt er zelf een houten constructie ontworpen en gemaakt. Figuur 24 geeft aan de linkerzijde het 3D-model weer en aan de rechterzijde de gerealiseerde proefbak.



*Figuur 24: 3D-model proefbak (links) en gerealiseerde proefbak (rechts)*

Deze houtconstructie is opgebouwd uit stevige betonmultiplex platen (18 mm dik) verstevigd met een vurenhout exoskelet van balken (46x46 mm). Het geheel bestaat uit vijf panelen samengehouden met bouten (M10) en bijhorende rondellen en moeren. Om de houtenbak extra stijf te maken en vervormingen te minimaliseren, is er een spanriem met houtblokken geplaatst rondom het midden van de bak. De proefbak zal volgende binnenafmetingen hebben:  $B \times L \times H = 0,75 \text{ m} \times 0,75 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$ .

De proefbak is zodanig ontworpen dat het ook kan dienen om de buffercapaciteit te testen. Hiervoor dient de bak waterdicht te zijn. Dit is bereikt door de voegen tussen de panelen op te vullen met rubberbanden en deze langs de binnen- en buitenzijde met silicone af te kitten. Daarenboven zijn de voegen langs binnen afgeplakt met duct tape. Om het water na de buffertest te laten weglopen is in één zijwand een kogelkraan voorzien. Aan de opening van de afvoerbuis is een fijn gaas voorzien zodat de gesteentes niet wegspoelen naar het waterreservoir en de metingen beïnvloeden. Zo wordt ook de dompel pomp beschermd tegen stenen. Het gaas heeft een maaswijdte kleiner dan de kleinste gesteentes. Tot slot is een doorzichtige buis verbonden met de binnenzijde van de bak en verticaal langs de proefbak geplaatst. Op deze manier is het mogelijk om de waterstand in de bak te controleren via het principe van communicerende vaten, verder toegelicht in paragraaf 3.5.

### 3.4 Korrelverdeling

De korrelverdeling van de drie verschillende types gesteentes werden steeds voor en na de belastingsproef bepaald. In totaal zijn er dus zes korrelverdelingsproeven uitgevoerd. Indien er veel verbrijzeling optreedt, zal er een duidelijk verschil zichtbaar zijn in de korrelverdeling. Bij verbrijzeling gaat er nadien ook aanzienlijk meer fijne fractie aanwezig zijn dan oorspronkelijk. De gemeten resultaten zijn echter wel afhankelijk van het genomen staal. Wanneer het staal meer kleine fractie bevat dan er gemiddeld aanwezig is de proefbak, geeft dit een vertekend beeld. Daarom is er gekozen om in de resultaten te werken met een accepteerbare afwijking van 15% hoger of lager ten opzichte van de korrelverdeling voor de belastingsproef. Indien de korrelverdeling na de belastingsproef tussen die grenzen valt is er geen aanzienlijke verbrijzeling opgetreden.

De proeven zijn uitgevoerd in het Technologiecentrum van de Universiteit Hasselt. Hier zijn zeven met de volgende maaswijdtes gebruikt om de korrelverdeling te bepalen: 63 mm – 45 mm – 31,5 mm – 22,4 mm – 16 mm – 11 mm. Er is gekozen voor deze zeefwijdtes omdat de kleinste en grootste korrelverdeling respectievelijk 20/32 en 32/50 zijn.

Een korrelverdeling wordt bepaald aan de hand van de massa's van de gesteentes die door de zeven vallen met bepaalde maaswijdtes. Er wordt een zeeftoeren opgebouwd met onderaan een opvangbak met daarop de zeven geplaatst. Hoe hoger in de toren, hoe groter de maaswijdte. Vervolgens wordt er langs boven in de toren een afgewogen hoeveelheid materiaal geplaatst. Eenmaal de trilplaat, waarop de toren staat, wordt geactiveerd begint het materiaal te zakken. De massa van het aggregaat dat na het trillen nog op een zeef ligt wordt genoteerd. Daarna wordt het cumulatieve massapercentage bepaald van de kleine fractie naar de grote fractie. Dit geeft dan het percentage weer van de massa die door de zeven is gevallen. Figuur 25 en Figuur 26 tonen aan hoe dergelijke zeven en zeeftoeren worden opgesteld.



Figuur 26: Zeef met granulaat [23]



Figuur 25: Zeeftoeren [23]

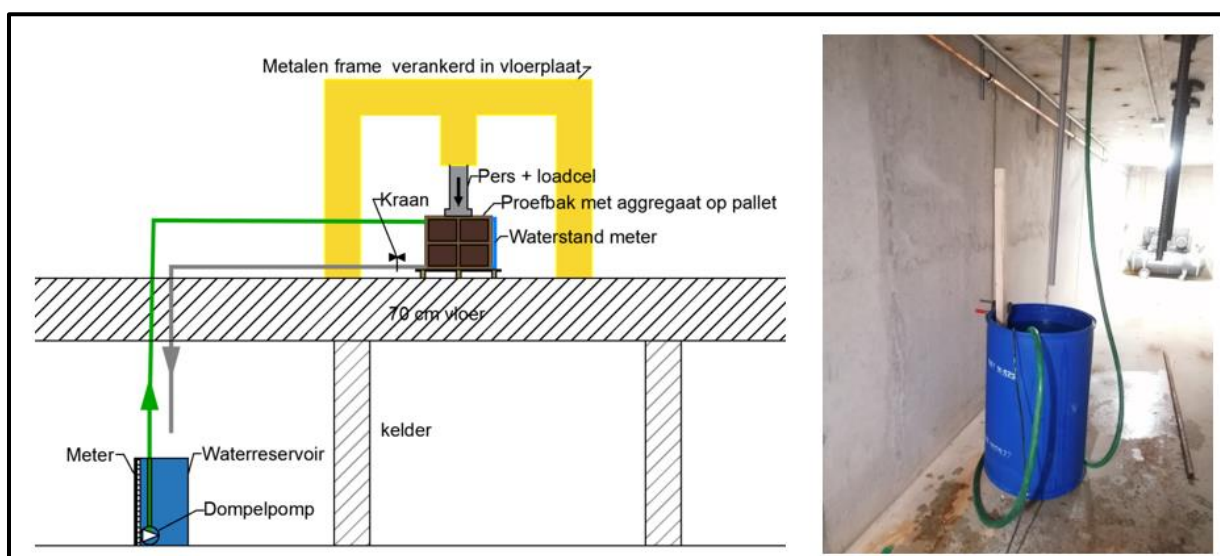
### 3.5 Buffercapaciteit

Naast de stabiliteit van de gesteentes is ook de buffercapaciteit van groot belang in dit onderzoek. De buffercapaciteit is de hoeveelheid water die één kubieke meter aggregaat kan bufferen en wordt uitgedrukt in  $l/m^3$ . De proefbak met de materialen is voorzien van een doorzichtige buis aan de zijkant om de waterstand in de bak te meten. Zo kan voor elk materiaal de watertoevoer op hetzelfde niveau stopgezet worden. Onderaan in de bak is een kraan voorzien om de bak te ledigen wanneer nodig, beiden zijn in Figuur 27 weergegeven.



Figuur 27: Waterstandmeter (links) - afvoerkraan (rechts)

Het waterreservoir bevindt zich in de kelder van het labo, zoals rechts weergegeven in Figuur 28. Tussen de twee verdiepingen ligt een betonvloer van 70 cm dik die voorzien is van gaten met diameter 40 mm. Deze gaten worden normaal gezien gebruikt om de constructies van proefopstellingen te verankeren. Bij dit onderzoek zijn de gaten ook gebruikt om de waterleidingen door te steken. De groene aanvoerleiding die naar de proefbak loopt, wordt gevoed door een dompelpomp die het water 4 m omhoog pompt in een buis met een diameter van 32 mm. De grijze afvoerleiding met een diameter van 32 mm, zichtbaar in Figuur 28, voert met behulp van de zwaartekracht het water terug af naar het waterreservoir. Onderaan is deze leiding niet tot in het reservoir gestoken, zodat de lucht in de leidingen vlot weg kan en geen tegendruk biedt aan het wegstromend water. In het reservoir is een houten balk met maatstreepjes om de 5 liter geplaatst, hierop kan het volume telkens afgelezen worden.



Figuur 28: Buffercapaciteit proefopstelling (concept en realiteit)

De buffercapaciteitsproef is in volgende sequenties uitgevoerd:

- 1) Voordat de proef start wordt het reservoir volledig gevuld met water.
- 2) Vervolgens pompt de pomp water uit het blauwe reservoir in de proefbak terwijl de uitlaatkraan van de bak open staat. Op deze manier stroomt er continu water in en uit de bak. Zo krijgen de aggregaten reeds de kans om water te absorberen, zodat het geabsorbeerde volume geen invloed zal hebben bij de bufferresultaten.
- 3) Daarna wordt de pomp uitgezet en blijft de afvoerkraan open zodat het water de bak kan verlaten tot aan de onderkant van de uitstroomopening. De effectieve bodem van de proefbak ligt 2,5 cm dieper dan de onderkant van die uitlaat. Door het volume van dit hoogteverschil op voorhand te vullen met water zal het geen effect hebben op de resultaten.
- 4) Eenmaal de voorbereidingen zijn uitgevoerd wordt de kraan dichtgedraaid.
- 5) De waterstand in het reservoir wordt gemeten en ingevuld bij  $V_b$  (= volume begin) in het invulblad, weergegeven in Tabel 5.
- 6) De pomp wordt vervolgens aangezet en vult de bak tot op het aangeduide niveau van de bak.
- 7) Eenmaal het aangeduide niveau is bereikt wordt de pomp stopgezet en wordt het waterniveau opnieuw gemeten en dit keer ingevuld bij  $V_e$  (= volume einde).
- 8) Het gebufferde volume ( $V_{tot}$ ) wordt bekomen door het eindvolume af te trekken van het beginvolume.
- 9) Om het gebufferde volume dubbel te controleren is het volumeverschil bij het leeglaten van de proefbak ook bepaald. Eerst wordt dus het volume  $V_b$  van het reservoir bepaald als de proefbak nog vol zit, vervolgens wordt de kraan opengedraaid en loopt de bak leeg. Dan kan het volume  $V_e$  weer afgelezen worden in het reservoir. Dit keer dient  $V_b$  van  $V_e$  te worden afgetrokken, omdat het kleinste volume van het grootste dient afgetrokken te worden.

De buffercapaciteit zal op drie tijdstippen per materiaal getest worden. De eerste keer net na de belastingen van fase 1, vervolgens na fase 2 en tot slot na fase 3. Tijdens het testen van de buffercapaciteit, worden er geen belastingen aangebracht. Dit verklaart de vlakke zones in de verplaatsingsgrafieken van paragraaf 4.2.

## 4 Resultaten belastingsproef

### 4.1 Dataverwerking belastingsproef

Bij het uitvoeren van de belastingsproef zijn de tijd, kracht en verplaatsing gemeten. Deze parameters zijn gemeten aan een frequentie van 26 Hz. Aangezien er gedurende twee uur gemeten is, zijn er ongeveer 200 000 lijnen data gevormd. De verkregen data werd vervolgens in Excel ingelezen om te verwerken. Het bestand met 200 000 lijnen data was te groot om vlot aan te werken en daarom is de data gefilterd tot 2,4 Hz. Om dit te bereiken zijn er per 11 rijen data, 10 rijen verwijderd. Zo bleven er per seconde 2,4 metingen over. Tijdens de proeven liep het meetprogramma regelmatig vast. Hierdoor telde de tijd niet meer op, maar bleef het continu tussen de -0,04 en -0,08 s fluctueren. Aangezien de meting wel nog aan de juiste frequentie gebeurde en tijd lineair is, was het eenvoudig om in Excel de correcte tijdstippen toe te voegen aan de resultaten. Dit probleem kwam voor bij de proeven op elk materiaal. De verplaatsings- en krachtsmeting ondervonden geen foutieve metingen.

Om snel te weten welke grafiek welk materiaal behandelt, is er gekozen om met verschillende kleuren te werken. De grafieken met betrekking tot ballast hebben een blauwe kleur, die van grind een groene kleur en die van betonpuin een oranje kleur.

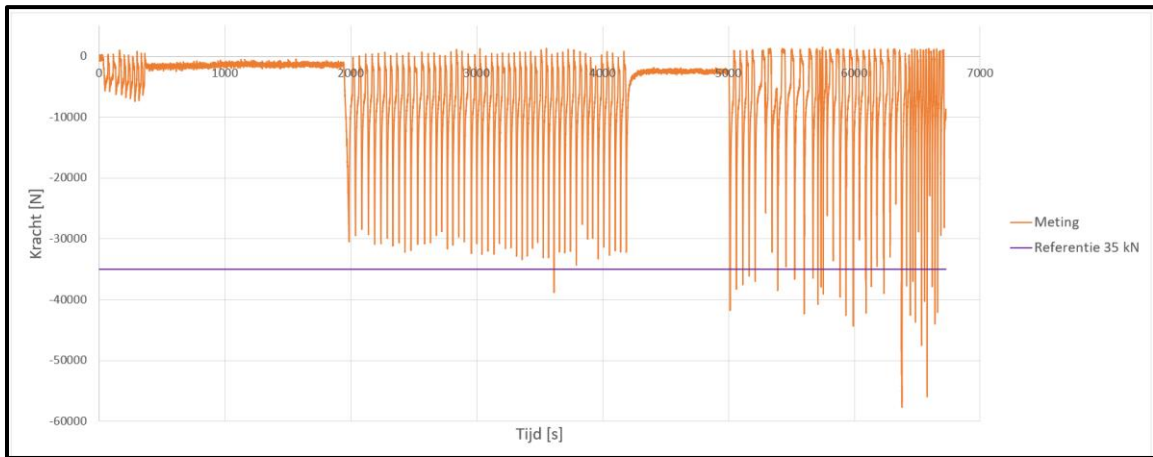
### 4.2 Bespreking resultaten belastingsproef

Deze paragraaf behandelt de resultaten van de belastingsproef op de drie aggregaattypes. Eerst worden de grafieken van de aangebrachte belasting per tijd besproken. Deze grafieken verklaren de vorm van de verplaatsingsgrafieken. Vervolgens wordt de vergelijking van de verplaatsing per tijd voor alle materialen besproken. Tot slot worden de verplaatsing-kracht grafieken besproken.

#### Interpretatie kracht-tijd grafieken

Figuur 29 tot en met Figuur 31 geven de grafieken met de drukkracht in functie van de tijd weer. De kracht heeft een negatieve waarde, dit omdat drukkracht een negatieve waarde heeft tijdens de metingen. De tijd wordt weergegeven in seconden. De aangebrachte drukkracht beïnvloedt de resultaten van de verplaatsing en moet in acht genomen worden bij het vergelijken van die resultaten. In de grafieken is een referentielijn van 35 kN getekend, idealiter schommelt de belasting rond 30 kN. Wanneer de 35 kN referentielijn overschreden wordt, is er te zwaar belast. Door deze referentielijn is het belastingsverschil per materiaal snel zichtbaar.

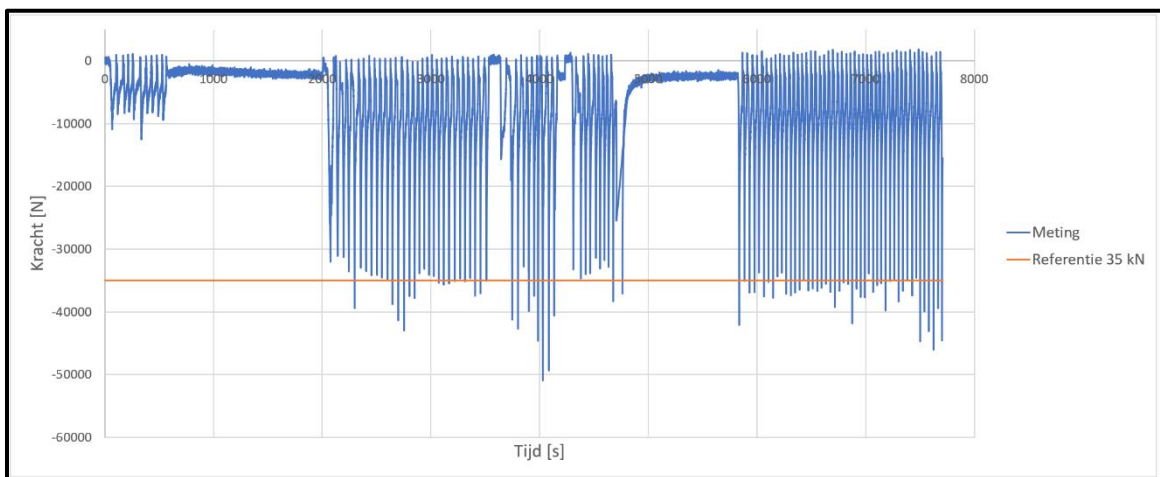
De overbelasting is te wijten aan het gebrek van een automatische sturing. Door elke belastingscyclus manueel te regelen is er een verhoogde kans op menselijke fouten en bovendien is de pers moeilijker te besturen naarmate de proef vordert. De hydraulische olie warmt op en wordt minder viskeus. Hierdoor is het moeilijker om de pers nauwkeurig te bedienen, wat resulteert in ongelijkmatige en vaak te hoge belastingen.



*Figuur 29: Kracht-tijd grafiek betonpuin*



*Figuur 30: Kracht-tijd grafiek grind*

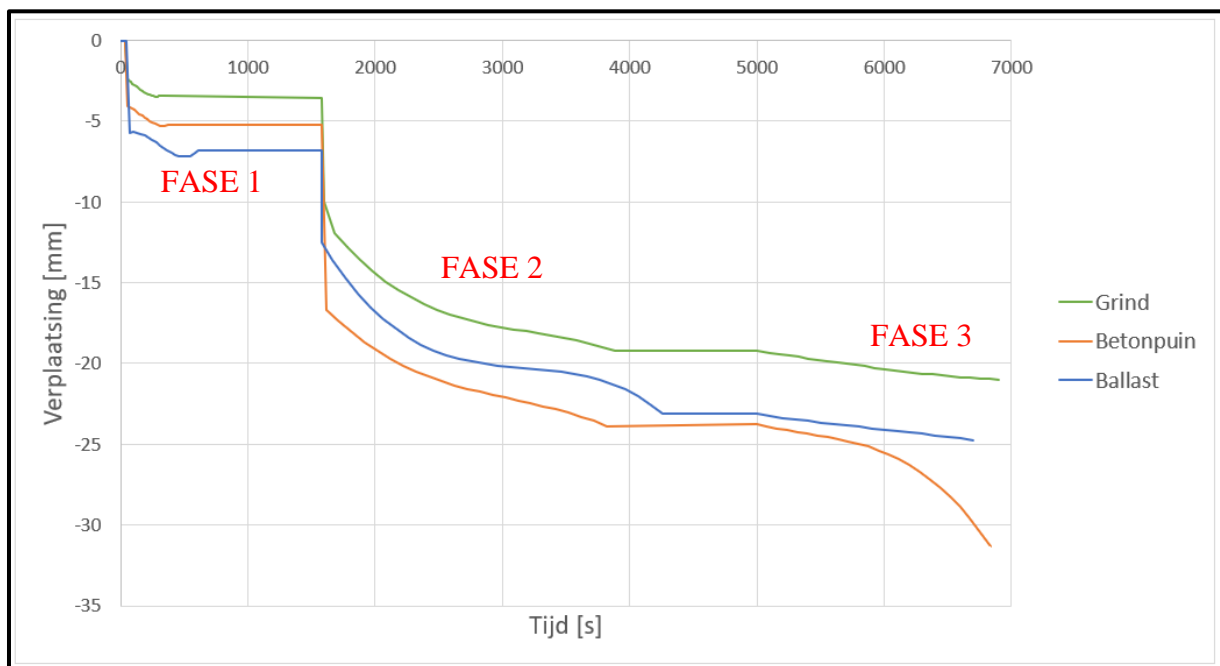


*Figuur 31: Kracht-tijd grafiek ballast*

## Interpretatie verplaatsing-tijd grafieken

### Algemeen

De grafiek in Figuur 32 geeft de trendlijnen van de verplaatsing doorheen de tijd weer. De trendlijnen zijn afkomstig van de figuren uit bijlage C. Dit geeft de mogelijkheid om de totale vervorming van de drie materialen met elkaar te vergelijken. In de grafieken zijn vlakke stukken zichtbaar, die zijn het gevolg van de onderbrekingen van de belastingen tijdens de bufferproeven. Per materiaal zijn er 2 horizontale stukken in de lijnen zichtbaar omdat er tijdens de drukproef twee keer de buffercapaciteit is getest. De lengte van de rechte stukken is niet altijd gelijk, omdat dit afhankelijk is van de snelheid waarop de proef is uitgevoerd. Om de data te vergelijken zijn de grafieken gemanipuleerd zodat elke fase gelijktijdig start. Figuur 32 toont de drie verschillende fases van de belastingsproef.



Figuur 32: Verplaatsing-tijd grafiek (alle materialen)

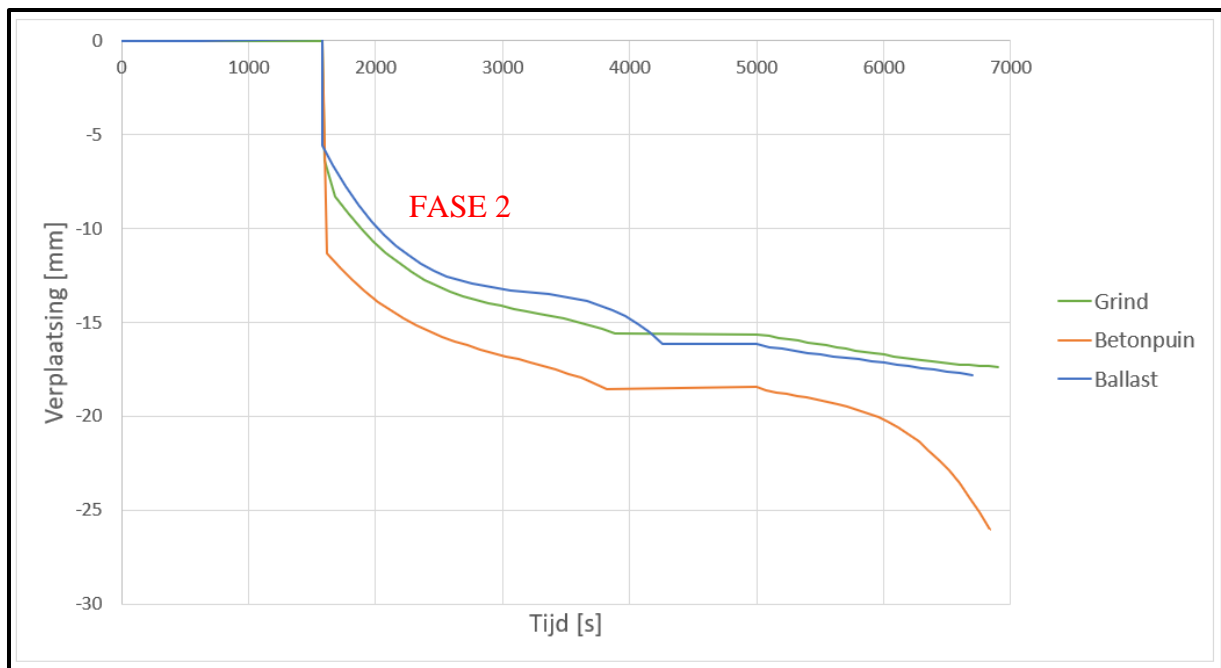
### Fase 1

Fase 1 toont een zettingsverschil tussen de drie materialen. Ballast ondervindt met een zetting van 7 mm de grootste zetting. Betonpuin ondergaat een zetting van 5 mm en grind ondergaat de kleinste zetting, namelijk 3 mm. Deze initiële zetting is voornamelijk te wijten aan de veranderende korreloriëntatie van de materialen. Een aggregaatlaag met grote stenen gaat meer initiële zetting vertonen aangezien de rotatie van een grote steen ook een grote verplaatsing tot gevolg zal hebben. Terwijl een aggregaatlaag met kleinere stenen een kleinere initiële zetting zal ondervinden. Bij fase 1 worden de aggregaten voor het eerst belast, met als gevolg dat de stenen gaan draaien om een stabiele toestand te bereiken. Dit verklaart de grotere zetting bij ballast 32/50 ten opzichte van betonpuin 20/40 en tevens de grotere zetting van betonpuin 20/40 ten opzichte van grind 20/32.

### Fase 2

Vervolgens worden in Figuur 33 de verplaatsingsgrafieken na fase 1 gekalibreerd op nul, zodat de curves op hetzelfde zettingsniveau beginnen aan fase 2. Op die manier kan de zetting tijdens de treinbelasting beter vergeleken worden voor de drie aggregaten. Deze aangepaste grafiek geeft de zetting bij fase 2 en fase 3 weer.





Figuur 33: Verplaatsing-tijd grafiek (gekalibreerd na fase 1)

In fase 2 is de belasting groter dan in fase 1, zoals reeds getoond in Figuur 29 tot en met Figuur 31, waardoor de invloed van de last op een dieper niveau in de laag waargenomen wordt. Daardoor treedt er extra verbrijzeling en/of korrelrotatie op in vergelijking met fase 1. In fase 2 vertoont betonpuin bijna 5 mm meer verplaatsing dan de andere twee aggregaten, weergegeven in Figuur 33. De verplaatsing bij betonpuin in fase 2 is onder andere te wijten aan verbrijzeling, dit wordt bevestigd door de korrelverdeling in hoofdstuk 5. Net onder de stalen verdeelplaat ontstaan er piekspanningen op het aggregaat. Hier is betonpuin verbrijzeld en de andere materialen niet. Dit komt doordat betonpuin een hogere LA- en mDe-waarde heeft dan de andere gebruikte aggregaten, weergegeven in Tabel 2. Bovendien zitten er onzuiverheden, zoals hout en plastic in het betonpuin. De exacte waarden van de onzuiverheden zijn weergegeven in bijlage B. Deze onzuiverheden gaan meer vervormen dan het aggregaat.

Het verschil in zetting is niet te wijten aan een overbelasting op betonpuin. Figuur 29 tot en met Figuur 31 tonen aan dat de belastingspieken bij betonpuin tijdens fase 2 rond 30 kN schommelen en slechts eenmaal de referentielijn van 35 kN overschrijden. Daarentegen zijn grind en ballast zwaarder belast, aangezien de belasting daar schommelt rond 35 kN.

Bij grind en ballast is de verplaatsing in fase 2 gelijkaardig. Grind ondervindt 1 à 2 millimeter meer zetting dan ballast in het begin van fase 2, hoewel ballast op het einde van fase 2 een grotere zetting vertoont dan grind. Gedurende de eerste helft van fase 2 worden ballast en grind gelijkmatig belast. In de tweede helft van de tweede fase wordt de belasting op de ballast onderbroken waardoor de verplaatsing kortstondig een plateau bereikt. Dit wordt gevolgd door belastingen van 50 kN, weergegeven in Figuur 31. Deze belastingen leiden op het einde van fase 2 tot meer zetting in ballast dan in grind. De verplaatsing-tijd curve is voor de drie materialen hyperbolisch in deze fase. Dit betekent dat er steeds minder zetting optreedt naargelang de proef vordert. De zetting gaat voor de drie materialen naar een constante waarde en wanneer deze limiet bereikt wordt, is er geen verdere zetting bij een treinbelasting van 30 kN.

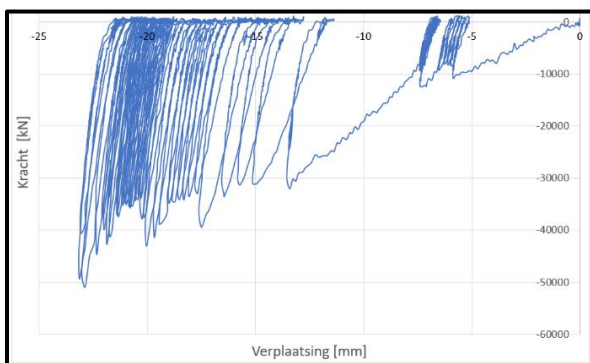
### Fase 3

In de derde fase reageren de aggregaten ballast en grind ook gelijkaardig. De verplaatsing-tijd curve daalt lineair, echter zonder een plateau bereikt wordt. Het niet bereiken van deze limietwaarde kan twee redenen hebben. Enerzijds kan de zettingslimiet nog niet bereikt zijn. Dit is echter onwaarschijnlijk want dan zou de verplaatsing-tijd curve meer hyperbolisch zijn zoals in fase 2. Anderzijds kan deze lineaire zetting het gevolg zijn van een toenemende belasting. Gedurende fase 3 is de referentiewaarde van 35 kN verschillende keren overschreden, Figuur 30 en Figuur 31 geven dit weer. In fase 3 is er zwaarder belast dan in fase 2, hierdoor is er geen constante zetting bereikt.

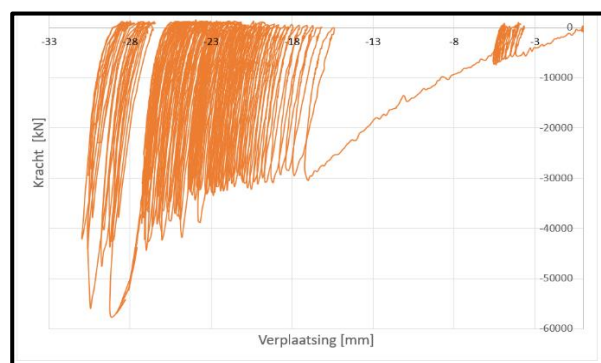
De belastingen in fase 3 op betonpuin hebben excessief grote waarden aangenomen. De treinbelasting wordt verschillende keren zwaar overschreden tot 58 kN en de frequentie van de belastingen zijn niet constant. De betonpuindata verzameld in fase 3 is hierdoor minder relevant. De invloed van deze waarneming op de korrelverdeling wordt verder besproken in paragraaf 5.2.

### Interpretatie kracht-verplaatsing grafieken

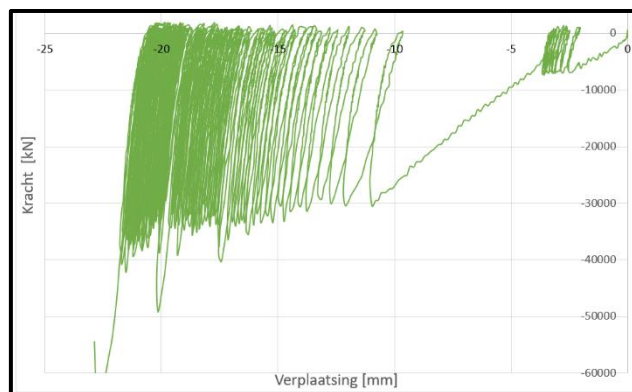
Wanneer de kracht-verplaatsing grafieken (Figuur 34, Figuur 35 en Figuur 36) van de drie materialen vergeleken worden kan dezelfde conclusie getrokken worden als uit de verplaatsing-tijd grafiek. Naarmate de proef vordert liggen de lijnen dichter bij elkaar, wat betekent dat er minder zetting optreedt per belastingscyclus. De zetting evolueert naar een constante waarde. Het aggregaat gedraagt zich deels elastisch, want na elke belastingscyclus veert het materiaal deels terug. Hierdoor ontstaan er lussen in de grafiek. Wanneer het aggregaat zwaarder belast wordt volgt een grotere zetting. Dit verklaart de toegenomen afstand tussen de lijnen op het einde van fase 3 bij ballast en betonpuin.



Figuur 34: Kracht-verplaatsing grafiek ballast

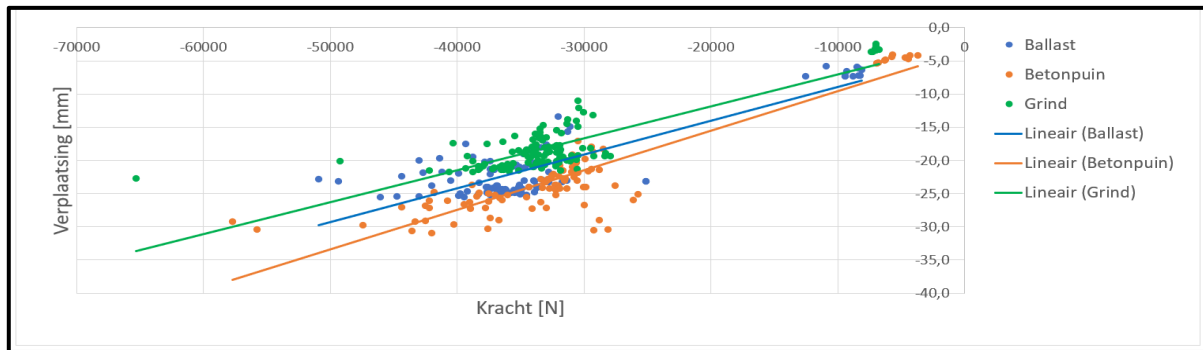


Figuur 35: Kracht-verplaatsing grafiek betonpuin



Figuur 36: Kracht-verplaatsing grafiek grind

Figuur 37 toont de verplaatsing die hoort bij de maximale kracht per cyclus. Voor eenzelfde belasting op de aggregaten ondervindt grind de minste zetting, dan ballast, gevolgd door betonpuin. De lineaire trendlijnen van grind en ballast lopen evenwijdig. Dit betekent dat grind en ballast evenveel vervormen bij een toename van de belasting, enkel de initiële vervorming verschilt. De lineaire trendlijn van betonpuin loopt steiler dan de andere twee aggregaten. Dit betekent dat bij dezelfde toenemende kracht, betonpuin meer zetting vertoont.



Figuur 37: Verplaatsing - piekkracht

## 5 Resultaten korrelverdeling

### 5.1 Dataverwerking korrelverdeling

Bij de korrelverdelingsproeven was er slechts een beperkte verwerking van de data vereist aangezien er significant minder metingen waren dan bij de belastingsproef. Voor elk materiaal zijn twee korrelverdelingsproeven uitgevoerd, eenmaal voor de belastingsproef en eenmaal na de belastingsproef. Bij ballast zijn vier verschillende maaswijdtes gebruik, terwijl bij grind en betonpuin telkens zes maaswijdtes gebruikt zijn. Dit is gebaseerd op de technische fiches van de materialen [13] [23].

- Ballast: 63 mm – 45 mm – 31,5 mm – 22,4 mm
- Betonpuin: 63 mm – 45 mm – 31,5 mm – 22,4 mm – 16 mm – 11 mm
- Grind: 63 mm – 45 mm – 31,5 mm – 22,4 mm – 16 mm – 11 mm

Het aggregaat ballast heeft twee zeven minder nodig dan de andere aggregaten, namelijk die met de maaswijdtes van 11 mm en 16 mm. De andere materialen hadden wel de kleinere maaswijdtes nodig. De technische fiches tonen aan dat er een fractie kleiner dan 22,4 mm aanwezig is bij grind en betonpuin [13] [23]. De keuze van de maaswijdtes bij ballast was correct, aangezien er geen materiaal door de maaswijdte 22,4 mm is gevallen. Bij betonpuin en grind was de keuze om extra kleinere maaswijdtes te gebruiken terecht. De twee extra zeven waren namelijk telkens gevuld met materiaal.

Na de zeefprocedure werd de massa van elke zeef inclusief de massa van het aggregaat bepaald. Vervolgens werd de massa van de zeef daarvan afgetrokken om zo de netto massa van het aggregaat te bekomen. Deze massa werd in de vierde kolom (doorval [g]) cumulatief opgeteld om de doorval per zeef te verkrijgen.

Daarna werd het percentage aggregaat dat door elke zeef is gevallen berekend. Deze waarden zijn gebruikt om de curve te vormen. De laatste twee kolommen zijn de waarden van de afwijkingsgrenzen zoals besproken in paragraaf 3.4. Deze grenswaarden zijn bepaald ten opzichte van de korrelverdeling voor de belastingsproef, zoals weergegeven in Tabel 4. De waarden van deze grenzen mogen nooit groter dan 100% of kleiner dan 0% zijn. Dergelijke tabel werd telkens opgesteld voor de drie aggregaten voor en na de belastingsproef, dit is weergegeven in bijlage D.

Tabel 4: Berekening korrelverdeling ballast voor de belastingsproef

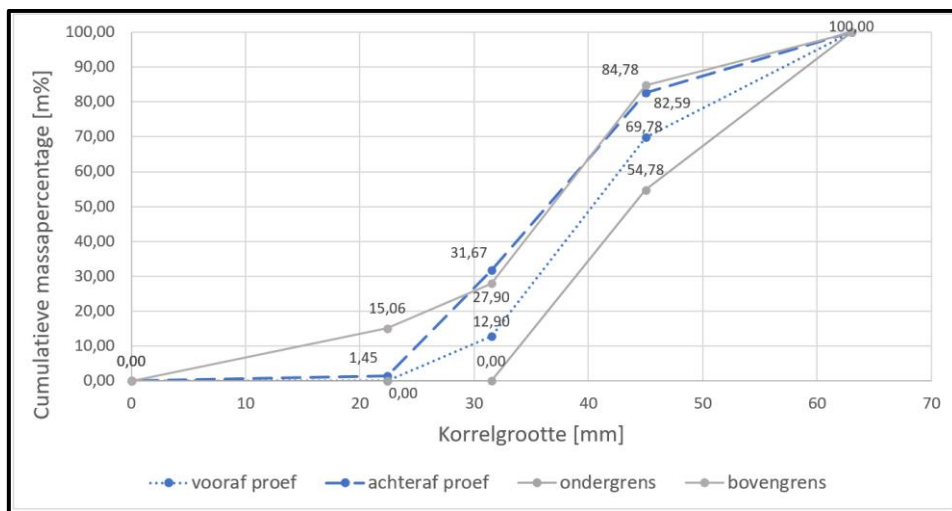
Ballast voor de belastingsproef						
Massa bak + materiaal:		7481 g				
Massa bak:		978 g				
Massa materiaal:		6503 g				
maaswijdte [mm]	massa zeef + materiaal [g]	massa materiaal [g]	doorval [g]	doorval [m%]	-15%	15%
63	1693	0	6503	100,00	100,00	100,00
45	3332	1965	4538	69,78	54,78	84,78
31,5	5128	3699	839	12,90	0,00	27,90
22,4	2215	835	4	0,06	0,00	15,06
0	1649	4	0	0,00	0,00	0,00
Totaal =		6503 g				

## 5.2 Bespreking resultaten korrelverdeling

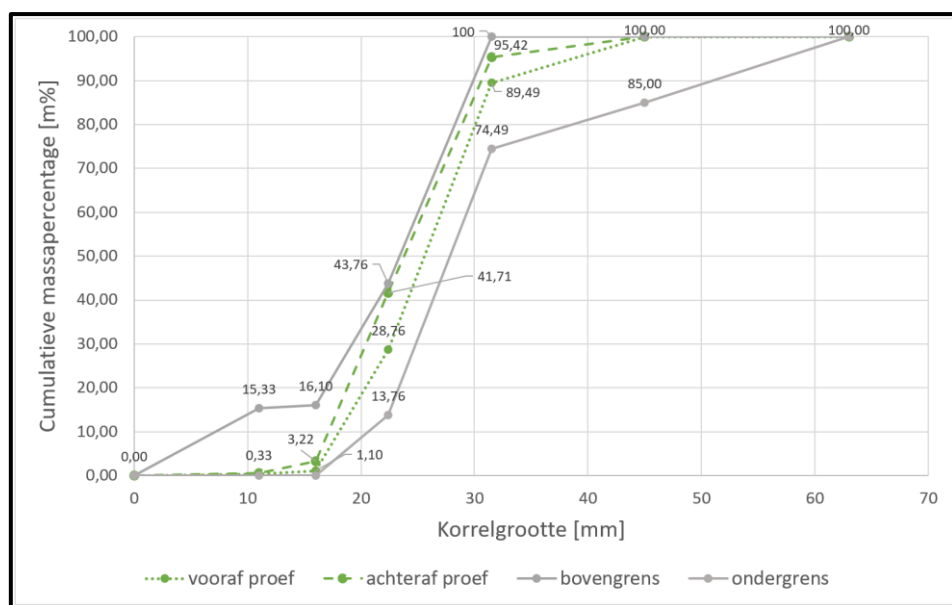
De resultaten van de korrelverdelingsproeven voor en na de belastingsproef van elk materiaal zijn weergegeven in korrelverdelingsdiagrammen. Deze geven op de horizontale as de korrelgrootte in mm weer en op de verticale as het cumulatieve massapercentage in m%. In het blauw wordt de grafiek van ballast weergegeven, in het groen die van grind en in het oranje die van betonpuin. De puntlijn geeft telkens de korrelverdeling voor de belastingsproef weer en de streeplijn geeft telkens de korrelverdeling na de proef weer. De boven- en ondergrens worden altijd door volle grijze lijnen aangeduid.

### Ballast en grind

De materialen ballast en grind vertonen geen significant verschil tussen de korrelverdeling voor en na de belastingsproef, weergegeven in Figuur 38 en Figuur 39. De korrelverdeling na de belastingsproef valt telkens net binnen de opgestelde grenzen van 15%. Dit betekent dat grind 20/32 en ballast 32/50 de nodige belasting aankunnen zonder te verbrijzelen. Dit is van groot belang bij dit onderzoek want indien er verbrijzeling optreedt, worden de holtes gevuld door kleine fractie en daalt de buffercapaciteit. Daarnaast zal het treinspoor niet perfect horizontaal liggen indien er lokaal differentiële zettingen optreden.



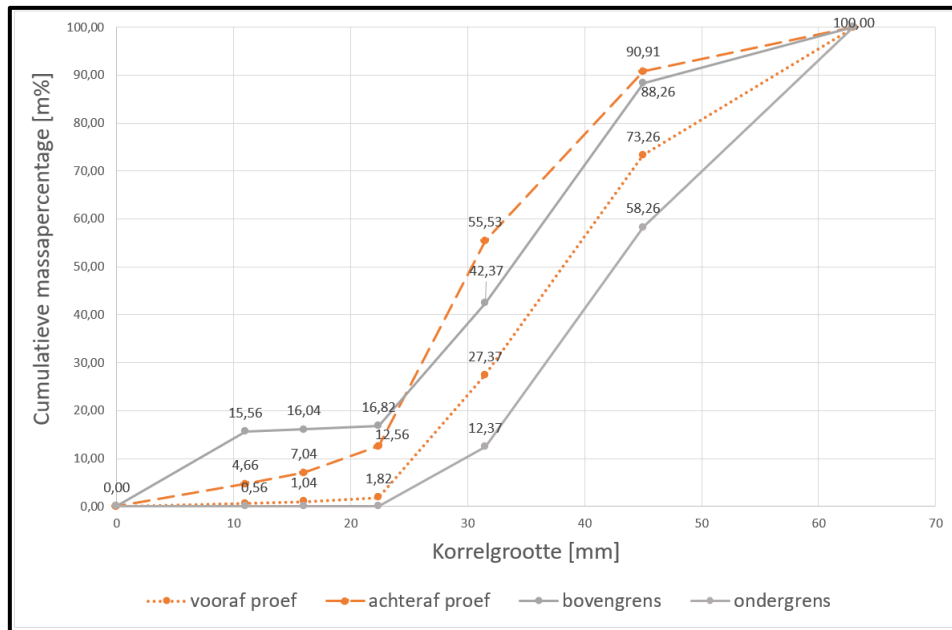
Figuur 38: Korrelverdeling ballast 32/50



Figuur 39: Korrelverdeling grind 20/32

## Betonpuin

Figuur 40 toont aan dat de korrelverdeling van betonpuin na de belastingsproef niet binnen de opgestelde grenzen valt, wat wijst op verbrijzeling. Deze verbrijzeling verklaart mede de grotere zettingen van het betonpuin ten opzichte van de andere materialen besproken in paragraaf 4.2. Eenmaal de aangebrachte belasting constant is, zal de bijkomende verbrijzeling afnemen. Bovendien is er meer kans op erosie. Wanneer erosie optreedt wordt de zandcementverbinding van het betonpuin afgebroken waardoor de drainagelaag kan verstopen. Zo wordt potentieel de levensduur van de drainerende laag ingekort.



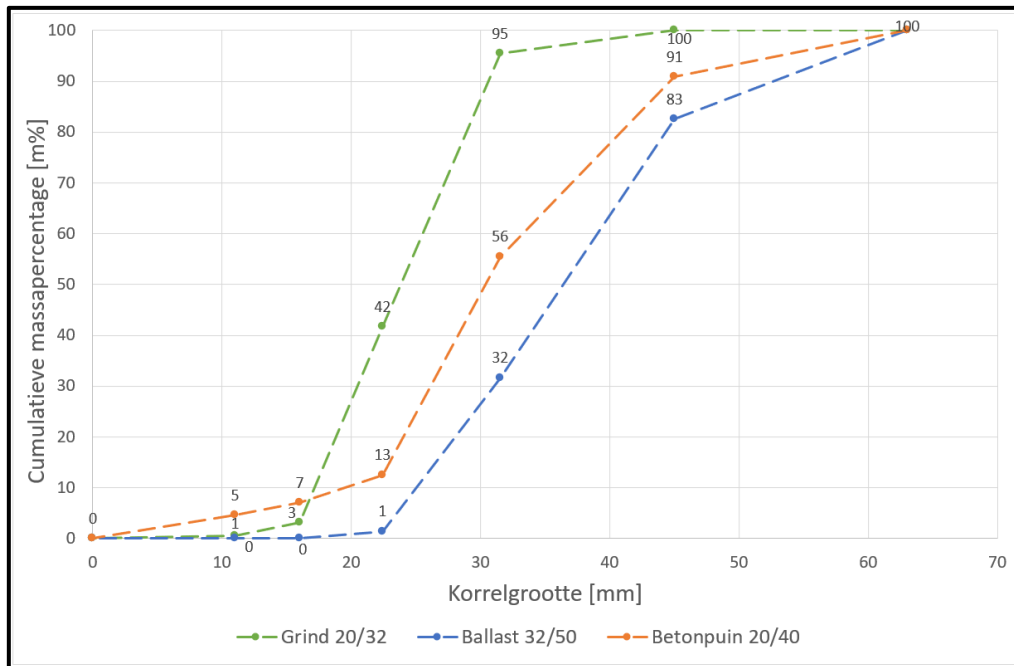
Figuur 40: Korrelverdeling betonpuin 20/40

Tabel 2 uit subparagraaf 2.3.4 toont de weerstand tegen verbrijzeling (LA) en de weerstand tegen afslijting (mDe) weergegeven in m% voor de drie aggregaten. Beide eigenschappen zijn belangrijk bij de verklaring van de verschillende korrelverdelingen. Betonpuin heeft voor deze eigenschappen een grotere waarde dan de andere twee aggregaten. Betonpuin heeft een maximale LA-waarde van 30 m%, terwijl grind en ballast respectievelijk een waarde van 16 m% en 12 m% hebben. Hoe lager dit getal is, hoe beter de weerstand tegen verbrijzeling is. Dit wil zeggen dat betonpuin de laagste weerstand heeft tegen verbrijzeling en er dus de meeste schade zal optreden. Bovendien heeft betonpuin de grootste mDe-waarde van 19 m%. Grind en ballast hebben respectievelijk een waarde van 11 m% en 7 m%. Dit wil zeggen dat betonpuin de meeste afslijting zal vertonen.

De betonpuinstalen genomen na de belastingsproef zijn bovenaan uit de proefbak genomen. Dit is ook de plaats waar de hoogste piekspanningen op de korrels plaatsvonden en waar dus de meeste verbrijzeling plaatsvond. Het is mogelijk dat onderaan in de proefbak er minder verbrijzeling is opgetreden.

## Algemeen

Vervolgens zijn de curves van de korrelverdeling na de belastingsproef voor alle drie de aggregaten samen weergegeven in Figuur 41. Het betonpuin heeft de vloeidendste curve. Hoe vloeender de curve is, hoe meer gespreid de korrelverdeling is. Wanneer een korrelverdeling gespreid is zijn er minder holtes in de aggregaatlaag. Dit is de reden dat het betonpuin de laagste buffercapaciteit heeft, dit is verder toegelicht in hoofdstuk 6. Daarnaast is ook zichtbaar dat de curves onderling ver uit elkaar liggen aangezien er verschillende korrelverdelingen besteld zijn.



Figuur 41: Korrelverdeling - overzicht van de drie aggregaten na de belastingsproef

## 6 Resultaten buffercapaciteit

### 6.1 Dataverwerking buffercapaciteit

Tijdens de uitvoering van de belastingsproef is na elke belastingsfase de buffercapaciteit gemeten. Hierbij werd gebruik gemaakt van een Excel-invulblad, zoals in Tabel 5 weergegeven. Hierin werden telkens het beginvolume (Vb) en eindvolume (Ve) ingevuld, om zo het totaal bufferende volume (Vtot) te bekomen. Daarnaast is ook de tijd gemeten die het water nodig heeft om de proefbak te vullen en te legen. Het volume water dat per seconde de proefbak inloopt is niet relevant voor het onderzoek omdat het zuiver afhankelijk is van de pomp en het hoogteverschil tussen de pomp en de ingang van de bak. Dit vuldebiet is dus hetzelfde voor de drie materialen. Het debiet voor de uitloop is wel relevant omdat dit afhankelijk is van de aggregaten. De leeglooptijd is rechts in Tabel 5 weergegeven in de kleine kaders en wordt uitgedrukt in l/s.

Tabel 5: Invulblad buffercapaciteit

BALLAST								
	VULLEN				LEGEN			
	Vb [l]	Ve [l]	Vtot [l]	Tijd in [mm:ss]	Vb [l]	Ve [l]	Vtot [l]	Tijd in [mm:ss]
Na fase 1	170	47,5	122,5	4:44	47,5	160	112,5	2:07
Na fase 2	160	50	110	4:18	50	160	110	2:01
Na fase 3	160	50	110	4:13	50	160	110	2:01

Leegloopdebiet
0,89 l/s
0,91 l/s
0,91 l/s
gemiddeld = 0,90 l/s

GRIND								
	VULLEN				LEGEN			
	Vb [l]	Ve [l]	Vtot [l]	Tijd in [mm:ss]	Vb [l]	Ve [l]	Vtot [l]	Tijd in [mm:ss]
Na fase 1	142,5	37,5	105	4:14	37,5	145	107,5	1:38
Na fase 2	147,5	40	107,5	4:17	40	147,5	107,5	1:39
Na fase 3	150	42,5	107,5	4:15	42,5	147,5	105	1:37

Leegloopdebiet
1,10 l/s
1,09 l/s
1,08 l/s
gemiddeld = 1,09 l/s

BETONPUIN								
	VULLEN				LEGEN			
	Vb [l]	Ve [l]	Vtot [l]	Tijd in [mm:ss]	Vb [l]	Ve [l]	Vtot [l]	Tijd in [mm:ss]
Na fase 1	142,5	45	97,5	3:51	45	145	100	1:42
Na fase 2	150	45	105	4:04	45	145	100	1:39
Na fase 3	155	47,5	107,5	4:14	47,5	145	97,5	1:36

Leegloopdebiet
0,98 l/s
1,01 l/s
1,02 l/s
gemiddeld = 1,00 l/s

Al de gemeten data is in de gele vakken ingevuld en de witte vakken werden automatisch bepaald aan de hand van formules. De bespreking van deze resultaten volgt in paragraaf 6.2. De bekomen volumes zijn voor een proefbak van 0,28 m<sup>3</sup> en dienen omgerekend te worden zodat ze per kubieke meter weergegeven worden. De volumes worden vermenigvuldigd met 3,56 om het aantal liter bufferend volume per kubieke meter materiaal te bekomen.



## 6.2 Bespreking resultaten buffercapaciteit

Tabel 6 toont de resultaten van de bufferproef. Deze waarden zijn bekomen door de buffercapaciteit na belastingsfase 3 van elk materiaal te vermenigvuldigen met 3,56. Deze factor is gebruikt om een omzetting te maken van het volume van de proefbak naar 1 m<sup>3</sup>. Ballast 32/50 heeft een buffercapaciteit van 391 l/m<sup>3</sup>, wat betekent dat 39% van het bruto volume kan dienen als buffer om water te stockeren. Grind 20/32 en betonpuin 20/40 hebben een kleinere buffercapaciteit van respectievelijk 373 l/m<sup>3</sup> en 347 l/m<sup>3</sup>. Dit wil zeggen dat ballast 18 l/m<sup>3</sup> meer kan bufferen dan grind en 44 l/m<sup>3</sup> meer dan betonpuin.

Tabel 6: Resultaten buffercapaciteit

	Ballast 32/50	Grind 20/32	Betonpuin 20/40
Buffercapaciteit [l/m <sup>3</sup> materiaal]	391	373	347
Bufferend volume t.o.v. bruto volume [%]	39	37	35
Vereiste laagdikte voor een buffercapaciteit van 0,1 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> [cm]	26	27	29

Het verschil in deze resultaten sluit aan bij de verwachtingen, namelijk dat het materiaal met de grootste aggregaten het meeste water kan stockeren voor eenzelfde laagdikte. De grotere stenen zorgen ervoor dat er grotere holtes ontstaan. Wanneer er weinig/geen kleine fractie is, zijn deze holtes gevuld met lucht of een vloeistof zoals water. Dit zorgt ervoor dat ballast meer potentieel heeft om water te bufferen dan grind, welke kleinere aggregaten heeft en dus ook kleinere holtes. Bij kleinere aggregaten zal echter wel het aantal holtes hoger liggen dan bij grote aggregaten, maar dit is niet proportioneel. Hierdoor is er toch een verschil in netto bufferend volume tussen aggregaten met een grote en kleine korrelverdeling.

Daarnaast is ook de spreiding van de korrelverdeling van belang voor de buffercapaciteit. Betonpuin 20/40 heeft een grotere korrelgrootte dan grind en heeft toch een kleiner bufferend volume. Dit is te wijten aan de grotere spreiding van de korrelverdeling bij betonpuin. De korrelverdeling in Figuur 41 toont aan dat betonpuin meer kleine fractie bevat dan de andere twee aggregaten. Dit zorgt voor opvulling van de holtes tussen de grote stenen en hierdoor daalt de buffercapaciteit.

Vervolgens is de vereiste laagdikte bepaald voor een buiduur van 48 u en 1,64 mm/u regenval. Hierbij wordt er uitgegaan van het ergste scenario waarbij de grond reeds volledig verzadigd is. In deze situatie is een buffercapaciteit van 0,1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> vereist, zoals besproken in subparagraaf 2.3.2. De nodige laagdikte om deze buffercapaciteit te behalen bedraagt voor ballast 26 cm. Deze dikte is aanvaardbaar want het heeft dezelfde grootteorde als de vormlaag (50 cm) en de onderlaag (20 cm). Bovendien vervangt deze bufferende laag de eventuele grondvervangende laag. Indien er grind 20/32 wordt gebruikt als bufferende laag, moet deze 27 cm dik zijn. Wanneer betonpuin 20/40 toch als bruikbaar aggregaat wordt beschouwd, dient deze laag 29 cm dik te zijn.

Tabel 7 toont aan dat ballast 0,90 l/s kan afvoeren in het opgestelde systeem. Betonpuin kan hier 1,00 l/s afvoeren en grind 1,09 l/s. Ballast heeft dus het laagste afvoerdebiet en grind het hoogste. Tabel 1 toont aan dat grof zand de beste infiltratiecapaciteit heeft met 0,00015 m<sup>3</sup>/s = 0,15 l/s. Dit betekent dat de geteste materialen een veel grotere infiltratiecapaciteit hebben dan de beste infiltrerende grondlaag. De totale infiltratiecapaciteit zal dus altijd bepaald worden door de ondergrond en niet door de aggregaten. Het verschil in de infiltratiewaarden van de aggregaten is niet relevant, aangezien ze alle drie proportioneel veel groter zijn dan die van de ondergrond.

Tabel 7: Gemiddelde leegloopdebieten

	Ballast	Grind	Betonpuin
Gemiddeld leegloopdebiet [l/s]	0,90	1,09	1,00

Op basis van de buffercapaciteit blijken alle drie de materialen geschikt te zijn als bufferende drainagelaag. Ballast 32/50 heeft meer buffercapaciteit dan de andere aggregaten. Hierdoor zal er minder ballast gebruikt moeten worden om de vereiste buffercapaciteit te behalen. De buffercapaciteit heeft dus invloed op de kostprijs van het drainerend massief.



## 7 Resultaten economische vergelijking

De materialen gebruikt bij het concept worden onderling economisch vergeleken. De transport- en aankoopkosten worden in rekening gebracht bij dit onderzoek. De aanlegkost van het drainerend massief wordt niet in rekening gebracht. Er wordt vanuit gegaan dat dit evenveel kost per materiaal en daarom geen invloed heeft op het resultaat. De prijzen zijn sterk afhankelijk van de grootte van de bestelling en van de transportafstand/regio. Daarom is de keuze gemaakt om te werken met een fictieve werf met onderstaande eigenschappen:

- traject van 1 km drainerend massief;
- 2 sporen breed (8 m breed);
- vereiste buffercapaciteit van 0,1m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>;
- 50 km transport voor hergebruikt materiaal en 100 km voor ongebruikt materiaal.

Tabel 8: Economische vergelijking

	Dikte	Breedte	Lengte	Volume	Eenheidsprijs materiaal	Dichtheid	Aankoop prijs	Transport afstand	Transportkost /km	Transportkost	Totale kost	Totale kost /ton incl. transport
	(cm)	(m)	(km)	(m <sup>3</sup> )	(Euro/ton)	(ton/m <sup>3</sup> )	(Euro)	(km)	(Euro/km/ton)	(Euro)	(Euro)	(Euro/ton)
Nieuwe ballast 32/50	26	8	1	2080	18	1,9	71136	100	0,17	67184	€ 138.320,0	€ 35,0
Herwonnen zuivere ballast 32/50	26	8	1	2080	0	1,9	0	50	0,17	33592	€ 33.592,0	€ 8,5
Herwonnen gereinigde ballast 32/50	26	8	1	2080	70	1,9	276640	50	0,17	33592	€ 310.232,0	€ 78,5
8,5% gereinigd, 91,5% zuivere b. 32/50	26	8	1	2080	5,95	1,9	23514	50	0,17	33592	€ 57.106,4	€ 14,5
Nieuwe grind 20/32	27	8	1	2160	13	1,95	54756	100	0,17	71604	€ 126.360,0	€ 30,0
Betonpuin 20/40	29	8	1	2320	8,5	1,6	31552	50	0,12	22272	€ 53.824,0	€ 14,5

In Tabel 8 wordt de prijs van de drainerende laag voor de fictieve werf berekend. Eerst wordt de dikte van elke laag links in de tabel weergegeven. Deze dikte is afhankelijk van de buffercapaciteit van het gebruikte materiaal, dit is besproken in paragraaf 6.2. Daarna worden de breedte, lengte en volume weergegeven. Vervolgens wordt de aankoopprijs per materiaal bepaald.

De aankoopprijs is afhankelijk van: de eenheidsprijs, het vereiste volume en de massadichtheid van het materiaal. De aankoopprijs van zuivere, herwonnen ballast is € 0, aangezien die herwonnen wordt uit de toplaag van een oud spoor. Wanneer niet-vervuilde ballast niet hergebruikt wordt na de afbraak, kost de afvoer en overname door een externe partij 15 €/m<sup>3</sup>. Deze kost wordt dus uitgespaard als ballast wel herwonnen wordt. Indien vervuilde ballast moet afgevoerd worden, kost dit meer dan 15 €/m<sup>3</sup>.

De transportkosten zijn een groot deel van de totale kost en moeten dus in rekening worden gebracht bij deze vergelijking. Er wordt vanuit gegaan dat betonbreekcentrales verspreid zijn over heel België. Daarom is de transportafstand bij betonpuin kleiner dan bij de aanvoer van nieuwe aggregaten. Nieuwe aggregaten moeten verder getransporteerd worden aangezien ze op minder plaatsen voorradig zijn. Voor de circulaire en nieuwe materialen zijn er respectievelijk 50 km en 100 km transport geteld. De transportkost voor ballast en grind is 0,17 €/ton/km en die van betonpuin is 0,12 €/ton/km. Deze prijzen zijn opgevraagd bij TUCRAIL en Baldewijns en zijn terug te vinden in bijlage E.

De aankoopprijs inclusief transport van zuivere, herwonnen ballast 32/50 is het goedkoopste, namelijk 8,5 €/ton. Wanneer de laag volledig wordt opgebouwd uit gereinigde, herwonnen ballast kan de prijs oplopen tot 78,5 €/ton. Het sterk toenemen van de prijs is te wijten aan de hoge reinigingskosten. Het is mogelijk om een samenstelling te gebruiken van gereinigde en zuivere ballast. Dit kan toegepast worden om de afvalberg van vervuilde ballast te verkleinen en toch een marktconforme prijs te bekomen. Het gereinigde volume aangevoerde ballast mag maximaal 8,5% bedragen om goedkoper te blijven dan de alternatieve aggregaten.

Betonpuin 20/40 heeft een totale kostprijs van 14,5 €/ton. Grind 20/32 is duurder dan betonpuin en herwonnen ballast en heeft een totale kostprijs van 30 €/ton. Het duurste materiaal is nieuwe ballast 32/50, met een totale kostprijs van 35 €/ton. Het gebruik van zuivere, herwonnen ballast is 6 €/ton goedkoper dan het beste alternatief, zijnde betonpuin. Dit komt neer op een prijsbesparing van 41,4% ten opzichte van betonpuin. Het gebruik van zuivere herwonnen ballast is 21,5 €/ton goedkoper dan grind. Dit komt neer op een prijsbesparing van 71,7% ten opzichte van grind.

# 8 Besluit

## 8.1 Conclusie

Na het voltooien van de onderzoeken en het bespreken van de resultaten, wordt in dit hoofdstuk een algemene conclusie gevormd. Op basis van de verplaatsingsgrafieken wordt geconcludeerd dat de zetting naar een limiet evolueert. Dit wil zeggen dat de zetting op lange termijn niet verder toeneemt bij gemengd treinverkeer. Betonpuin vertoont de grootste totale verplaatsing. De verplaatsing bij ballast en grind liggen nauw bij elkaar en vertonen beiden minder verplaatsing dan betonpuin bij eenzelfde belasting. Hieruit blijkt dat ballast en grind op vlak van stabiliteit meer geschikt zijn om als bufferende laag onder een treinspoor te functioneren.

Daarnaast werd de korrelverdeling getest voor de drie aggregaten. Ballast en grind vertonen na de belastingsproef een korrelverdeling die binnen de opgestelde grenzen van 15% valt. Daardoor wordt verbrijzeling bij deze materialen verwaarloosd. Bij betonpuin treedt er echter wel verbrijzeling op, wat leidt tot de grotere zettingen zoals waargenomen bij de verplaatsingsproef. De verbrijzeling zorgt ervoor dat de bufferende laag op lange termijn kan verstoppelen waardoor de bufferende en infiltrerende functies verdwijnen. Betonpuin is niet bruikbaar als bufferende laag onder het treinspoor.

Vervolgens is de buffercapaciteit van de drie aggregaten op korte termijn getest. De resultaten van de bufferproef vertonen voor alle materialen een acceptabele waarde tussen de 391-347 l/m<sup>3</sup>. Ballast heeft de grootste buffercapaciteit, namelijk 391 l/m<sup>3</sup>, gevolgd door grind met 373 l/m<sup>3</sup> en betonpuin met 347 l/m<sup>3</sup>. De buffercapaciteit van betonpuin ligt hier nog relatief hoog omdat het enkel op korte termijn is getest, de verbrijzeling heeft dus nog geen effect op de buffercapaciteit. Bij ballast is een laagdikte van 26 cm vereist om een buffercapaciteit van 0,1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> te bereiken. Voor grind en betonpuin is respectievelijk een dikte van 27 cm en 29 cm vereist.

Tot slot is er een prijsvergelijking gemaakt voor de aankoop en transport van de aggregaten. De totaalprijs is het laagst voor een drainerende laag bestaande uit 100% zuivere herwonnen ballast 32/50, namelijk 8,5 €/ton. Het gebruik van zuivere herwonnen ballast is 6 €/ton goedkoper dan het goedkoopste alternatief, zijnde betonpuin met een prijs van 14,5 €/ton. Dit komt neer op een prijsbesparing van 41,4% ten opzichte van betonpuin. Ballast is 21,5 €/ton goedkoper dan grind, dit komt neer op een prijsbesparing van 71,7%.

Deze masterthesis concludeert dat herwonnen ballast 32/50 het meest geschikte aggregaat is om een drainerende bufferlaag onder het treinspoor te vormen. Op basis van de verplaatsing en de korrelverdeling vertonen ballast en grind de beste resultaten. Betonpuin vertoont hier echter slechtere resultaten doordat het aggregaat verbrijzelt. Rekening houdend met de buffercapaciteit en de kostprijs komt ballast naar voor als meest geschikte aggregaat. Bovendien is dit een circulair materiaal, waardoor de keuze ecologisch verantwoord is.

## 8.2 Kritische beschouwing

De drainerende bedding bestaande uit herwonnen ballast voldoet aan de volgende doelstellingen:

- Het concept past in de omgeving. De drainerende bedding bevindt zich onder de bestaande oppervlakte van de spoorinfrastructuur. Er zijn geen bijkomende onteigeningen nodig voor het toepassen van de drainerende bedding.
- De stabiliteit van de spoorweg is gegarandeerd voor gemengd treinverkeer.
- De buffercapaciteit voldoet voor een buiduur van 48u met intensiteit van 1,64 mm/u, indien de herwonnen ballastlaag 26 cm dik is.
- Onderhoud van het drainerende massief is beperkt. Door de grote oppervlakte is de kans op verstoppingen kleiner, waardoor minder onderhoud vereist is. De bovenliggende lagen hebben reeds een reinigende functie. Zij houden het grove vuil zoals bladeren en takken tegen.
- Het concept past binnen het verhaal van circulaire economie. Ballast wordt herwonnen uit oude spoorwegen die vervangen worden.
- De aanleg van de bedding is arbeidsextensiever dan de aanleg van afvoerioleringen. Er moeten namelijk geen rioleringsbuizen worden voorzien, waardoor er ook geen ingewikkelde aansluitingen nodig zijn. Het drainerend massief bestaat slechts uit een aggregaat met een dikte van 26 cm.

## 8.3 Toekomstig onderzoek

Enkele suggesties voor verder onderzoek worden in dit hoofdstuk vernoemd, aangezien er tijdens de uitvoering enkele verbeterpunten opgemerkt zijn. Eerst en vooral is het aangeraden om een automatisch gestuurde pers te gebruiken, waarbij de kracht en de periode kan worden ingesteld. Deze pers moet de kracht gedurende enkele seconden aanhouden. Bij de automatische sturing kan er gewerkt worden met een hogere en constante precisie. De automatische pers zorgt voor dezelfde input waardes (kracht, belastingsduur en aantal cycli), waardoor de resultaten direct met elkaar vergeleken kunnen worden. Hierdoor is de vergelijking tussen de aggregaten correcter en eenvoudiger. Daarnaast is de verdichtingsfase aan 20% van de treinbelasting voor een duur van 10 cycli niet ideaal. Een verdichting aan 100-120% van de treinbelasting zorgt voor meer initiële zetting in fase 1 en hierdoor zal er minder zetting plaatsvinden in de overige twee fases. Een verhoging van het aantal belastingen zal duidelijker de limietwaarde van de zetting weergeven. Tot slot is het correcter om de korrelverdeling voor de gehele massa van aggregaten te testen in plaats van een steekproef. Hierdoor worden zowel de stenen onderaan als boven aan in de laag onderzocht en vergeleken.

# Referentielijst

- [1] „statistiekvlaanderen,” [Online]. Available: <https://www.statistiekvlaanderen.be/nl/lengte-spoorwegennet>. [Geopend 14 februari 2022].
- [2] „verhardingen,” 21 april 2022. [Online]. Available: <https://www.vlaanderen.be/statistiek-vlaanderen/ruimtegebruik/verharding>. [Geopend 05 juni 2022].
- [3] HOLCIM, „Drainerende funderingen,” 2019.
- [4] Fränkische, „Railpipe,” Duitsland, 2019.
- [5] ProRail, „ProRail,” 22 juni 2016. [Online]. Available: <https://www.prorail.nl/nieuws/op-het-spoor-van-het-ek-2016-belgie#:~:text=Het%20Belgische%20spoorwegnet%20heeft%203.607,zoals%20tunnels%2C%20overbruggingen%20en%20voetgangersbruggen..>
- [6] „Bovin-beton,” [Online]. Available: <https://www.bovin-beton.be/nl/producten.php?prodid=5>. [Geopend 8 december 2021].
- [7] „Martens,” [Online]. Available: <https://martensgroep.eu/nl/producten/riolering/betonbuizen/infiltratiebuizen>. [Geopend 08 december 2021].
- [8] „awouters,” [Online]. Available: <https://www.awouters.be/index.php/putten/infiltratieputten>. [Geopend 14 februari 2022].
- [9] „Vlaamse milieumaatschappij,” [Online]. Available: <https://www.vmm.be/water/bouwen/regenwater/infiltratie>. [Geopend 2021 december 2021].
- [10] „Wikimedia commons,” [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A\\_small\\_drainage\\_ditch\\_on\\_Harris\\_Farm\\_-\\_geograph.org.uk\\_-\\_1516709.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_small_drainage_ditch_on_Harris_Farm_-_geograph.org.uk_-_1516709.jpg). [Geopend 08 december 2021].
- [11] J. kunststoffen, „Jobicell infiltratiebox,” [Online]. Available: <https://www.joostenkunststoffen.nl/nl/pageid/kunststoffabrikaten-jobicell>. [Geopend 8 december 2021].
- [12] R. Puystiens, „Uitvoeringstechnische aspecten bij beddingswerken,” TUCRAIL.
- [13] INFRABEL, „Technische Bepaling L-11,” 2007.
- [14] C. Esveld, „ontwerp van spoorwegbovenbouw,” TU Delft.
- [15] „getty images,” [Online]. Available: <https://www.gettyimages.be/detail/foto/aggregate-gravel-consisting-of-larger-dark-and-royalty-free-beeld/657933330>. [Geopend 12 december 2021].
- [16] „Code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van rioleringssystemen, deel 5,” Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid, 2021.
- [17] W. Seerden, „keermuurconstructies met gewapende bodem,” 2009.
- [18] L. A. Q. Imad, H. D. Samer, K. Jayhyun en T. Erol, „Geogrid in Flexible Pavements: Validated Mechanism,” 2008.



- [19] „abg creative geosynthetic engineering,” [Online]. Available: <https://www.abg-geosynthetics.com/applications/ground-reinforcement-subgrade-stabilisation.html>. [Geopend 13 december 2021].
- [20] B. van Zegbroeck, *Geotechniek 2*, UHasselt, 2021.
- [21] w. Francken, „Ontwikkeling schaalproeven voor,” TU Eindhoven, Eindhoven, 2015.
- [22] M. Chen, Y. Abu-Farsakh en Qiming, „Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing,” 2011.
- [23] C. -. s. 0975/0015, „Technische fiche betongranulaat 20/40 mm,” Baldewijns, 2021.
- [24] „Vlaanderen: Departement landbouw & visserij,” [Online]. Available: <https://lv.vlaanderen.be/nl/voorlichting-info/publicaties/praktijkguidsen/water/duurzaam-watergebruik-algemeen/belang-van-2>. [Geopend 7 december 2021].
- [25] C. i. waterbeleid, „Code van goede praktijk voor het ontwerp, de aanleg en,” 2012.
- [26] „Richtlijnen bovengrondse infiltratie RBI V1,” 2018.
- [27] „Geopunt,” [Online]. Available: <https://www.geopunt.be/>. [Geopend 8 december 2021].
- [28] „DOV Vlaanderen,” 2022. [Online]. Available: <https://www.dov.vlaanderen.be/page/actuele-grondwaterstandindicator#:~:text=De%20freatische%20grondwaterstand%20schommelt%20tijdens,het%20einde%20van%20de%20zomer.> [Geopend 14 februari 2022].
- [29] „Geerkens,” [Online]. Available: <https://www.eurocompost.be/kiezel-grind-split/split/edelsplit-black/edelsplit-black-20-32/>. [Geopend 21 februari 2022].
- [30] „grind,” [Online]. Available: <https://www.grind.be/steenslag/basalt-split?code=3920>. [Geopend 21 februari 2022].
- [31] Hegrola, „prijslijst breekwurf,” 2020.
- [32] „Degro,” [Online]. Available: <https://www.degro.be/nl/prijslijst/>. [Geopend 21 februari 2022].
- [33] „MAtest,” [Online]. Available: <https://www.matest.com/en/product/a077-micro-deval-testing-machine>. [Geopend 20 April 2022].
- [34] „Beton Lexicon,” 15 oktober 2018. [Online]. Available: <https://www.betonlexicon.nl/N/Normzeven>. [Geopend 8 mei 2022].
- [35] bodemlandbouwgewassen. [Online]. Available: <https://bodemlandbouwgewassen.jouwweb.nl/vereenvoudigde-bodemkaart-van-belgie>. [Geopend 02 mei 2022].

# Bijlagen

<b>Bijlage A: Informatie treinverkeer .....</b>	<b>56</b>
<b>Bijlage B: Grenswaardes vervuiling Baldewijns .....</b>	<b>57</b>
<b>Bijlage C: Verplaatsing-tijd grafieken belastingsproef .....</b>	<b>60</b>
<b>Bijlage D: Tabellen korrelverdeling .....</b>	<b>61</b>
<b>Bijlage E: Prijzen aggregaten.....</b>	<b>64</b>

## Bijlage A: Informatie treinverkeer

	<b>TGV (SNCF)</b> uniform verkeer	<b>ICE (DB)</b> gemengd verkeer	<b>HSL-zuid (NS)</b> uniform verkeer
snelheden	reizigers: TGV-SE: 270 km/h TGV-A: 300 km/h  geen goederen	reizigers: ABS: 200 km/h NBS: 250 km/h goederen: 100-160 km/h	reizigers: 300 km/h minimum: 220 km/h
aslasten	165 kN	225 kN	170 kN
boogstralen	4000 m (uitz 3250 m)	ABS: gegeven NBS: 7000 m (uitz 5100 m)	4900 m (uitz. 4250 m)
verkanting	180 mm	ABS: 160 mm <sup>1)</sup> (was 150 mm) NBS: 45 mm (uitz 65 mm)	165 mm (toek. 180 mm)
verkantingstekort	100 mm (270 km/h) 130 mm (300 km/h)	ABS: 150 mm <sup>1)</sup> (was 130 mm) NBS: 60 mm (uitz 80 mm)	max. 70 mm (uitz. 85 mm)
hellingen	TGV-SE: 35 ‰ TGV-A : 25 ‰	NBS: 12,5 ‰	25 ‰
verticale afrondingsbogen	dalboog: 12000 m topboog: 16000 m	NBS: 25000 m	dalboog: 18000 m topboog: 20000 m
overgangsboog	300 m		495 m (toek. 540 m)
spoorafstand	4,20 m	NBS: 4,70 m	4,5 m
wissels	overloopwissel 1:46 (160 km/h) splitsing 1:65 (220 km/h)	NBS: overloop 1:24,5 (130 km/h) splitsing 1:42 (200 km/h)	overloopwissel 1:47 (160 km/h) splitsing 1:62 (220 km/h)
kunstwerken	TGV-SE: niet nodig TGV-A : tunnels	NBS: tunnels en viaducten <sup>2)</sup>	tunnels en viaducten

**TECHNISCHE FICHE**

**SNELCODE 0972/0015**



technische fiche

CERTIFICATIE VAN

**GERECYCLEERDE GRANULATEN - VASTE LOCATIE**



Deze technische fiche werd afgedrukt op 15/04/2022.  
De geldigheid van deze fiche kan nagekeken worden op  
<http://extranet.copro.eu/>



TECHNISCHE FICHE		
SNELCODE	VERSIE	GELDIGHEID
<b>0972/0015</b>	<b>2.2 - 28/09/2021</b>	<b>GECERTIFICEERD</b>
CERTIFICAATHOUDER	PRODUCTIEEENHEID	CERTIFICAATNUMMER
BALDEWIJNS & CO Veldstraat 170 BE-3511 Kuringen +32 11 25 42 21 <a href="mailto:info@baldewijns.be">info@baldewijns.be</a>	BALDEWIJNS & CO Albertkanaalstraat 179 BE-3511 Stokrooie +32 11 25 42 21 <a href="mailto:steven@baldewijns.be">steven@baldewijns.be</a>	BENOR 972/10B Gerecycleerde granulaten - vaste locatie

PRODUCT	
OFFICIËLE BENAMING	COMMERCIEËLE BENAMING
<b>BETONGRANULAAT 20/40MM</b>	<b>E4 - BETONGRANULAAT 20/40MM</b>
OPSCHRIFT OP HET PRODUCT	
Geen. Zie gegevens op afleveringsbon.	
TOEPASSING	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> VLAREMA  <input checked="" type="checkbox"/> PTV 406 (9.0)                 </div> <div style="text-align: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> EN 13242+A1 (2007)                 </div> </div> <p>Dit product werd niet nagekeken volgens de doorstreepte referentiedocumenten of voldoet er niet aan.</p>	
Gebruik:	CONFORM NBN EN 13242

TOELICHTINGEN (DIT VALT NIET ONDER HET EXTERN TOEZICHT IN HET KADER VAN DE BENOR-CERTIFICATIE)
AANDACHTSPUNTEN - NOG TE CONTROLEREN DOOR DE AFNEMER (NIET LIMITATIEF)
Deze door COPRO gewaarmerkte fiche maakt integraal deel uit van het BENOR-certificaat. De garantie dat de geleverde gerecycleerde granulaten gecertificeerd zijn wordt enkel bevestigd indien ELKE VRACHT geïdentificeerd is door een ORIGINELE AFLEVERINGSBON met oplopend volgnummer met vermelding van de snelcode van het desbetreffende product.
TOELEVERINGSVORM
Bulkgoederen.
EXTRA INFORMATIE

Rc = Beton(-producten), ...  
 Ru = Hydraulisch gebonden en ongebonden granulaten  
 Waarvan Rn = Natuursteen  
 Rb = Baksteen, keramische producten, kalkzandsteen, argexbeton, ...  
 Ra = Koolwaterstofmengsels  
 Rg = Glas  
 X = Niet-vlottende verontreinigingen o.a. metaal, pleisterwerk, ...  
 Fl = Vlottende verontreinigingen o.a. hout, drijvende cellenbeton, ...

**Contactpersoon bij**

\* COPRO: Michaël Van Schelvergem +32 2 468 00 95 michael.vanschelvergem@copro.eu  
 \* Certificaathouder: Kurt Van Rompaey +32 4 71 92 92 06 kurt.vanrompaey@baldewijns.be

**PRODUCTEIGENSCHAPPEN**

EIGENSCHAPPEN	PROEFNORM	EENHEID	WAARDE	MIN	MAX
Classificatiebeproeving fractie groter dan 4mm: (*)	PTV 406		-	-	-
Rc		%	-	70	100
Rcug		%	-	90	100
Rb		%	-	0	10
Ra		%	-	0	5
Rg		%	-	0	2,0
X		%	-	0	1,0
FL		cm <sup>3</sup> /kg	-	0	5,0
Korrelverdeling (Doorval): (*)	NBN EN 933-1		20/40 GC80-20 GTCNrf4	-	-
Zeef 80mm		%	-	100	100
Zeef 56mm		%	-	98	100
Zeef 40mm		%	-	80	99
Zeef 20mm		%	-	0	20
Zeef 10mm		%	-	0	5
Zeef 0.063mm		%	-	0	4
Methyleenblauwproef (*)	NBN EN 933-9 Bijl. A	g/kg	MBF10	0	10
Humusgehalte (*)	NBN EN 1744-1 § 15		OSPass	-	-
Droge volumieke massa (*)	NBN EN 1097-6	Mg/m <sup>3</sup>	-	1,50	-

(\*) Deze producteigenschappen zijn een verklaring van de producent ontleend aan zijn prestatieverklaring. De certificaathouder verklaart dat de vermelde waarden in overeenstemming zijn met de prestatieverklaring.

**WAARMERKING**

De BENOR-certificatie van het product geeft aan dat op basis van een periodiek extern toezicht een voldoende mate van vertrouwen bestaat dat de certificaathouder in staat is om doorlopend de conformiteit van het product, zoals vastgelegd in de referentiedocumenten en in TRA 10 (BENOR) (4.0) te waarborgen.

Deze technische fiche bevat de prestaties van kenmerken die door de producent verklaard worden. De technische fiche wordt door de certificatie-instelling geverifieerd.

De certificaathouder verklaart een product te leveren dat conform is aan deze technische fiche zoals vermeld op de leveringsbon.

Door het digitaal beschikbaar stellen verklaart de producent zich akkoord met deze fiche

Naam: Kurt Van Rompaey  
Datum: 11/01/2021

**COPRO**

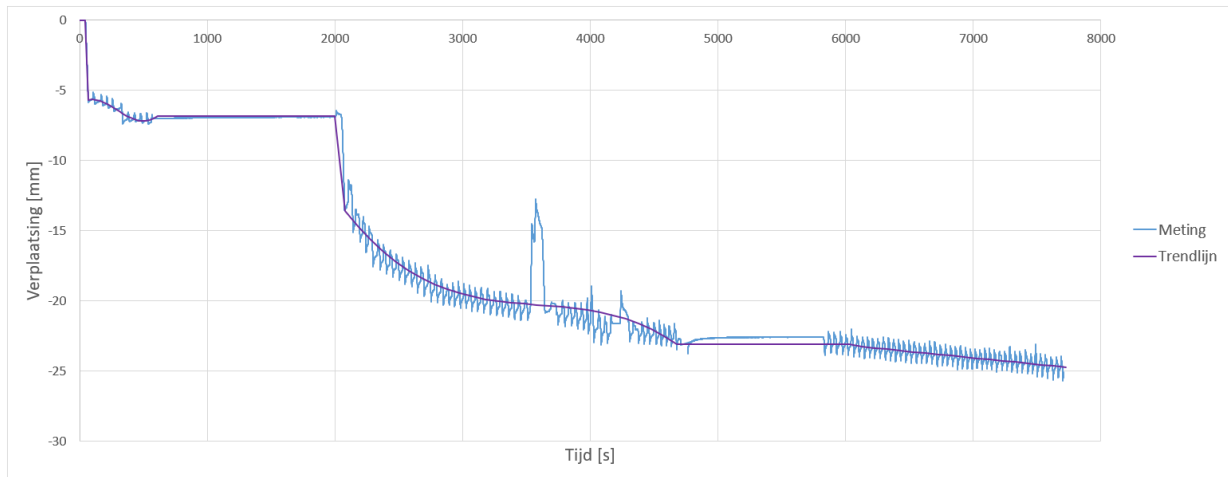
Naam: Michaël Van Schelvergem  
Datum: 11/01/2021  
Handtekening:



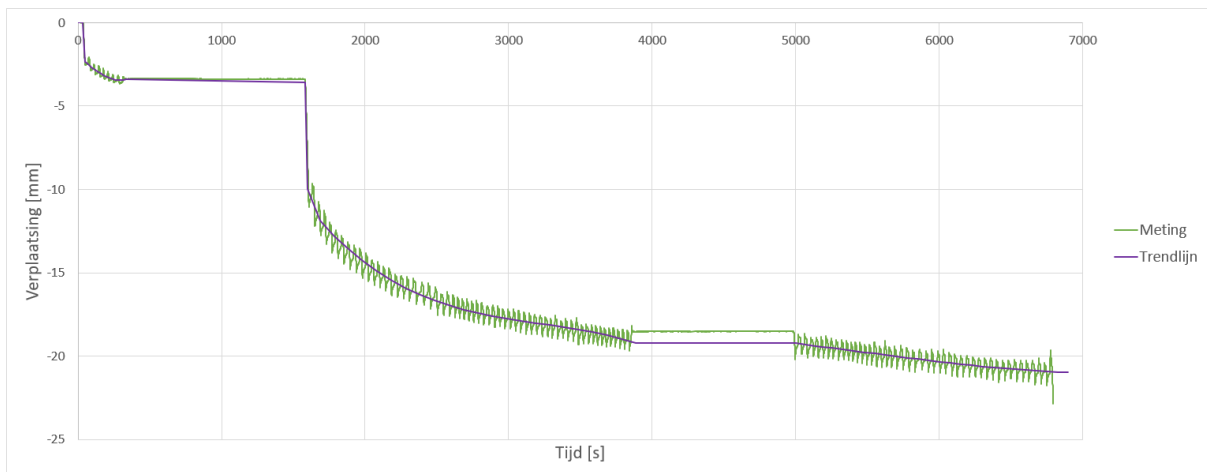
COPRO vzw - Z.1 Researchpark - Kranenberg 190 - B-1731  
Zellik

## Bijlage C: Verplaatsing-tijd grafieken belastingsproef

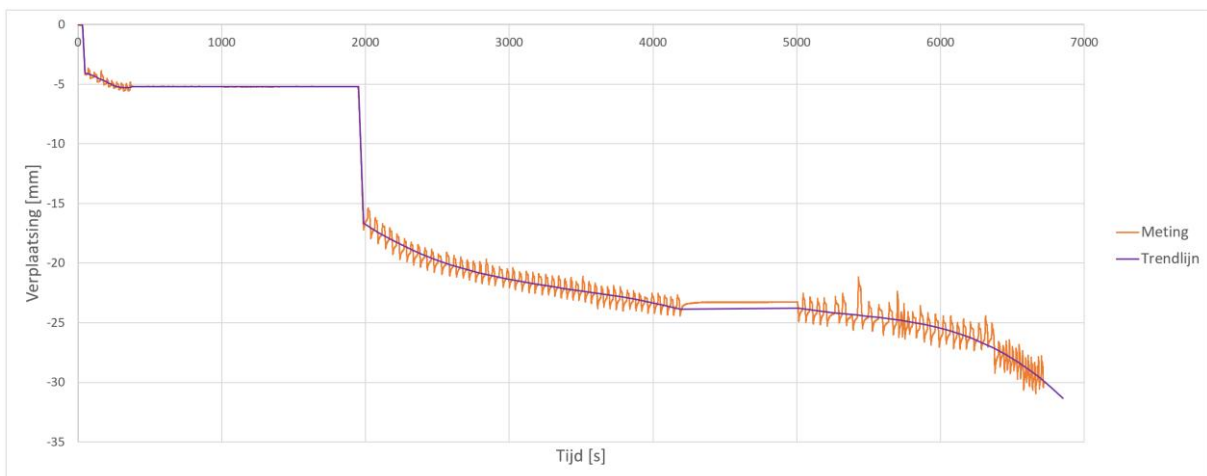
### Ballast



### Grind



### Betonpuin



## Bijlage D: Tabellen korrelverdeling

### Ballast

Ballast voor de belastingsproef												
<table border="1"> <tr> <td>Massa bak + materiaal:</td> <td>7481 g</td> </tr> <tr> <td>Massa bak:</td> <td>978 g</td> </tr> <tr> <td>Massa materiaal:</td> <td>6503 g</td> </tr> </table>							Massa bak + materiaal:	7481 g	Massa bak:	978 g	Massa materiaal:	6503 g
Massa bak + materiaal:	7481 g											
Massa bak:	978 g											
Massa materiaal:	6503 g											
maaswijdte [mm]	massa zeef + materiaal [g]	massa materiaal [g]	doorval [g]	doorval [m%]	-15%	15%						
63	1693	0	6503	100,00	100,00	100,00						
45	3332	1965	4538	69,78	54,78	84,78						
31,5	5128	3699	839	12,90	0,00	27,90						
22,4	2215	835	4	0,06	0,00	15,06						
0	1649	4	0	0,00	0,00	0,00						
Totaal =		6503 g										

Ballast na de belastingsproef										
<table border="1"> <tr> <td>Massa bak + materiaal:</td> <td>8548 g</td> </tr> <tr> <td>Massa bak:</td> <td>983 g</td> </tr> <tr> <td>Massa materiaal:</td> <td>7565 g</td> </tr> </table>					Massa bak + materiaal:	8548 g	Massa bak:	983 g	Massa materiaal:	7565 g
Massa bak + materiaal:	8548 g									
Massa bak:	983 g									
Massa materiaal:	7565 g									
maaswijdte [mm]	massa zeef + materiaal [g]	massa materiaal [g]	doorval [g]	doorval [m%]						
63	1693	0	7565,00	100,00						
45	2684	1317	6248,00	82,59						
31,5	5281	3852	2396,00	31,67						
22,4	3666	2286	110,00	1,45						
0	1755	110	0,00	0,00						
Totaal =		7565 g								

Informatie zeven		
Zeefnr.	Grootte zeef [mm]	Gewicht zeef [g]
1	63	1693
2	45	1367
3	31,5	1429
4	22,4	1380
5	0	1645
Totaal		7514



## Grind

Grind voor de belastingsproef												
<table border="1"> <tr> <td>Massa bak + materiaal</td> <td>6508 g</td> </tr> <tr> <td>Massa bak</td> <td>977 g</td> </tr> <tr> <td>Massa materiaal</td> <td>5531 g</td> </tr> </table>							Massa bak + materiaal	6508 g	Massa bak	977 g	Massa materiaal	5531 g
Massa bak + materiaal	6508 g											
Massa bak	977 g											
Massa materiaal	5531 g											
maaswijdte [mm]	massa zeef +	massa	doorval	doorval	-15%	+15%						
63	1693	0	5535	100,00	100,00	100,00						
45	1367	0	5535	100,00	85,00	100,00						
31,5	2011	582	4953	89,49	74,49	100						
22,4	4741	3361	1592	28,76	13,76	43,76						
16	2911	1531	61	1,10	0,00	16,10						
11	1318	43	18	0,33	0,00	15,33						
0	1663	18	0	0,00	0,00	0,00						
Totaal =		5535 g										

Grind na de belastingproef										
<table border="1"> <tr> <td>Massa bak + materiaal</td> <td>6664 g</td> </tr> <tr> <td>Massa bak</td> <td>977 g</td> </tr> <tr> <td>Massa materiaal</td> <td>5687 g</td> </tr> </table>					Massa bak + materiaal	6664 g	Massa bak	977 g	Massa materiaal	5687 g
Massa bak + materiaal	6664 g									
Massa bak	977 g									
Massa materiaal	5687 g									
maaswijdte [mm]	massa zeef + materiaal [g]	massa materiaal [g]	doorval [g]	doorval [m%]						
63	1693	0	5677,00	100,00						
45	1367	0	5677,00	100,00						
31,5	1689	260	5417,00	95,42						
22,4	4429	3049	2368,00	41,71						
16	3565	2185	183,00	3,22						
11	1424	149	34,00	0,60						
0	1679	34	0,00	0,00						
Totaal =		5677 g								

Informatie zeven		
Zeefnr.	Grootte zeef [mm]	Gewicht zeef [g]
1	63	1693
2	45	1367
3	31,5	1429
4	22,4	1380
5	16	1380
6	11	1275
7	0	1645
Totaal		10169

## Betonpuin

Betonpuin voor de belastingsproef						
Massa bak + materiaal		6649 g				
Massa bak		978 g				
Massa materiaal		5671 g				
maaswijdte [mm]	massa zeef + materiaal	massa materiaal [g]	doorval [g]	doorval [m%]	-15%	+15%
63	1693	0	5670	100,00	100,00	100,00
45	2883	1516	4154	73,26	58,26	88,26
31,5	4031	2602	1552	27,37	12,37	42,37
22,4	2829	1449	103	1,82	0,00	16,82
16	1424	44	59	1,04	0,00	16,04
11	1302	27	32	0,56	0,00	15,56
0	1677	32	0	0,00	0,00	0,00
Totaal =		5670 g				

Betonpuin na de belastingsproef				
Massa bak + materiaal		5817 g		
Massa bak		977 g		
Massa materiaal		4840 g		
maaswijdte [mm]	massa zeef + materiaal [g]	massa materiaal [g]	doorval [g]	doorval [m%]
63	1693	0	4832	100,00
45	1806	439	4393	90,91
31,5	3139	1710	2683	55,53
22,4	3456	2076	607	12,56
16	1647	267	340	7,04
11	1390	115	225	4,66
0	1870	225	0	0,00
Totaal =		4832 g		

Informatie zeven		
Zeefnr.	Grootte zeef [mm]	Gewicht zeef [g]
1	63	1693
2	45	1367
3	31,5	1429
4	22,4	1380
5	16	1380
6	11	1275
7	0	1645
Totaal		10169

## Bijlage E: Prijzen aggregaten Betonpuin (Baldewijns)



Ben Vanbergen <ben.vanbergen@student.uhasselt.be>

---

### Masterproef: levering betonpuin

---

Kurt Van Rompaey <kurt.vanrompaey@baldewijns.be>  
Aan: Ben Vanbergen <ben.vanbergen@student.uhasselt.be>

4 mei 2022 om 17:19

Dag Ben

Alvast een ruwe berekening.

De standaard prijs voor betongranulaat (niet betonpuin) 20/40, is € 8,5 per ton. 2.900 m<sup>3</sup> is ongeveer een 6.000 ton. Dit zou je dus een € 51.000 kosten aan materiaal. Wij rekenen geen kilometerprijs, maar rekenen per regio, gerekend vanaf onze breekwerf. Bijvoorbeeld:

- o regio Hasselt: € 70/vracht
- o regio Bilzen: € 90/vracht
- o regio Genk: € 110/vracht
- o regio Tongeren: € 130/vracht

Ik heb aan een collega gevraagd om een fictieve offerte hiervoor op te maken. I bezorg je dit zsm.

Fijne avond!

Met vriendelijke groeten,

**Kurt Van Rompaey**

Interne preventieadviseur -  
Medewerker Certificering -  
Bedrijfsontwikkeling

m: +32 (0) 471 92 92 06  
e: [kurt.vanrompaey@baldewijns.be](mailto:kurt.vanrompaey@baldewijns.be)  
[www.baldewijns.be](http://www.baldewijns.be)



## Grind/ballast (TUC RAIL n.v.)



Ben Vanbergen <ben.vanbergen@student.uhasselt.be>

### Masterproef: prijsvergelijking

PUYSTIENS Rony <Rony.PUYSTIENS@tucrail.be>

19 mei 2022 om 18:36

Aan: Noah Schoenmakers <noah.schoenmakers@student.uhasselt.be>

Cc: SCHERPEREEL Kurt <Kurt.SCHERPEREEL@tucrail.be>, MAEKELBERG Wim <wim.maekelberg@tucrail.be>, Ben Vanbergen <ben.vanbergen@student.uhasselt.be>

Beste Noah,

Hierbij een antwoord op je vragen:

- Aankooprijzen ballast: Ik weet niet meer precies welke prijzen ik je eerder overmaakte, maar dit zijn in ieder geval de meest recente:

Artikel	Vest	Artkelomschrijving	ASrt	Prs	Prijs	Val.	BHE	PKm	ABC	Wrkd	GG
100100070001	631P	Fijne steenslag 0/8 voor dienstpaden	ERSA	V	8,06	EUR	TO	Z2		3101	10
100100400001	631P	Steenslag voor onderlaag Type I 0/32	ERSA	V	11,41	EUR	TO	Z6		3101	10
100125500001	631P	Ballast Type IB kaliber 31,5/50	ERSA	V	18,13	EUR	TO	Z2		3101	10
100200400001	631P	Steenslag voor onderlaag Type II 0/32	ERSA	V	7,70	EUR	TO	Z4		3101	10
100225500001	631P	Ballast Type II kaliber 31,5/50	ERSA	V	17,49	EUR	TO	Z2		3101	10
100322400001	631P	Ballast Type III kaliber 20/32	ERSA	V	12,22	EUR	TO	Z2		3101	10
100325500001	631P	Ballast Type III kaliber 31,5/50	ERSA	V	16,86	EUR	TO	Z4		3101	10

De meest gebruikte ballast is van het kaliber 31.5/50. Je kan deze ramen op 18 €/ton (= omgerekend ca. 34 €/m<sup>3</sup>)

- Transport:
  - Transport per vrachtwagen: ca. 0.17 €/ton\*km (lege vrachten worden dus niet in rekening gebracht)
  - De prijs voor transport van drainerende steenslag 20/32 verschilt niet van deze van ballast
  - Afvoer per trein is duurder en eigenlijk alleen nuttig als het om grotere hoeveelheden gaat. Voor zover het interessant is voor jullie, geef ik ter info het antwoord van een collega even mee:

*"Aanvoer ballast per trein. In het beste geval is een kop-staart verbinding nodig (2 loco's) en zijn er 20 tremels met elk 55T ballast. Dit is 1100T ballast. Elke tremelwagen kost 22€/dag, 440€/dag voor de hele trein. Men zal deze 3 dagen nodig hebben: 1d in de groeve, 1 dag naar de werf, 1 dag terug naar Schaarbeek. Dus ca. 1320€ voor de tremels voor de 3 dagen. Qua tractie heeft men Dubbele tractie 2 HLD T73, 82, 62 of 77 met 1 bestuurder aan 2700€/prestatie en men heeft 3 prestaties minstens nodig. Men heeft ook een treinbegeleider nodig aan 54.1€/uur en deze werken steeds een shift van 8u. Hier heeft men ook 3 prestaties nodig. Enkele tractie Tractievoertuig HLD T73, 82, 62 of 77 met bestuurder kost 1500€ per prestatie. Verschil tussen enkele en dubbele is afhankelijk van hellingsgraad sporen om in de werfzone te geraken, afhankelijk van toegankelijkheid werf (in- en uitrit), beschikbare tijd om frontwissel uit te voeren, om al dan niet een baantrein op te duwen (dit is af te raden, max. 20km/h)".*

- Afvoer + overname (door de aannemer) van ballast:
  - niet vervuilde ballast: 15 €/m<sup>3</sup>  
(let wel: dit is de prijs voor afvoer van "zuivere" ballast, waarmee bedoeld wordt dat de ballaststeenslag minder dan 25% assen of ander bodemmateriaal bevat. Zo niet bedraagt de prijs eerder ca. 30€/m<sup>3</sup>)
  - vervuilde ballast die reinigbaar is: afhankelijk van de aard en concentratie van vervuiling: 60 à 80 €/ton (\*)
  - vervuilde ballast die niet reinigbaar is → stortkosten: 100 €/ton (\*)

(\*) Posten voor reinigen of storten vergoeden we in "ton" omdat de materialen in die centra gewogen worden. Voor omrekenen naar m<sup>3</sup> rekenen wij voor ballast met een densiteit van 1.9 t/m<sup>3</sup>

Mvg,