

# Utvärdering av alternativa storleksfördelningar för järnvägsmakadam

Experimentell och numerisk analys av järnvägsmakadam

Johannes Quist, Pontus Malmsköld, Anita Ullrich, Caroline Ansin

**Fraunhofer-Chalmers Centre**

Kristoffer Hofling

**NCC Industry**

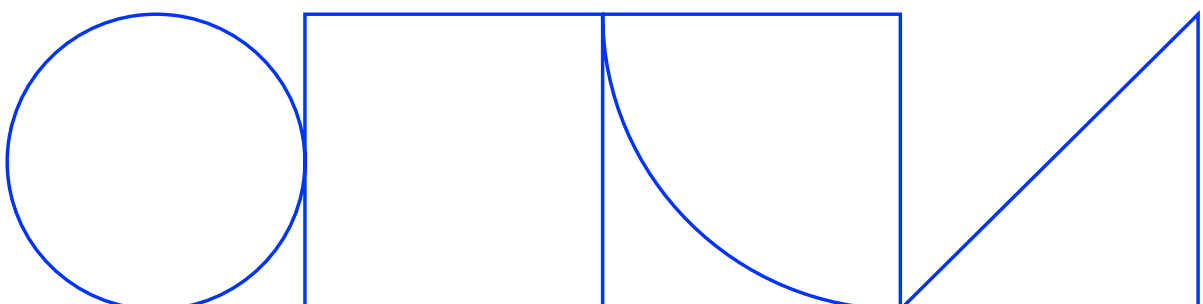
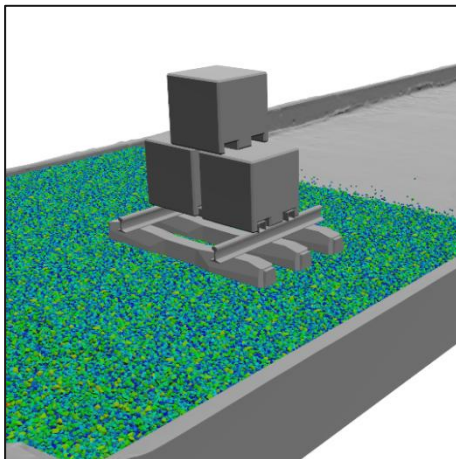
Andreas Persson, Christoffer Brauer, Mikael Knutsson

**Dynapac Compaction Equipment**

Magnus Evertsson

**Chalmers University of Technology**

2026-04-30



## Förord

Denna rapport presenterar resultaten från SBUF-projektet avseende utvärdering av alternativa kornstorleksfördelningar för järnvägsmakadam. Arbetet har genomförts som ett samarbetsprojekt mellan Fraunhofer-Chalmers Centre, NCC Industry, Dynapac Compaction Equipment och Chalmers tekniska högskola, där experimentella försök och numerisk modellering har kombinerats för att analysera hur kornstorleksfördelningen påverkar makadamens beteende.

Huvudförfattare till rapporten är Johannes Quist, med bidrag från Pontus Malmsköld, Caroline Ansin och Kristoffer Hofling.

Författarna vill rikta ett stort tack till alla partners och individer som har bidragit till projektet. Särskilt tack riktas till teamet vid Dynapac Compaction Equipment (Andreas Persson, Christoffer Brauer, Mikael Knutsson och Maria Wilhelmsson) för deras omfattande arbete med utvecklingen av testuppställningen för sleeper push test, inklusive konstruktion av rigg, uppbyggnad samt engagerade insatser under provkampanjerna. Ett särskilt tack riktas även till Per Olsson (POAB) för utmärkt arbete med schaktning och maskinhantering samt för hans praktiska expertis under genomförandet av försöken.

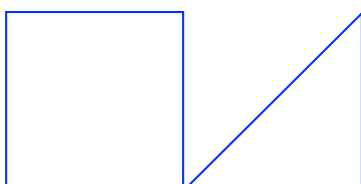
Författarna vill vidare tacka Alex Hägerström vid NCC Hemmesjö för stöd i produktion av makadam och hantering av de specialframtagna materialen, samt Urban Svensson vid Walleverken för tillhandahållande av det hydrauliska system som användes i testuppställningen. Ett särskilt tack riktas även till Heidelberg Materials Abetong och Ulf Malmqvist för att generöst ha bidragit med slipers och befästningssystem till projektet.

Slutligen vill författarna tacka projektets referensgrupp för värdefulla synpunkter och diskussioner under projektets gång, inklusive Jan Englund och Joel Björkquist (Skanska), Peter Martinsson (Swerock), Magnus Evertsson (Chalmers tekniska högskola), Klas Hermelin och Johan Jonsson (Trafikverket) samt Björn Schouenborg och Lars Jacobsson (RISE).

Projektet har finansierats av SBUF och Vinnova InfraSweden2030, vars stöd härmed tacksamt erkänns.

April 2026

Johannes Quist



## **Executive Summary (English)**

### **Background and problem formulation**

The performance of railway ballast is strongly influenced by its particle size distribution, which governs packing, load transfer, deformation, and degradation. Current standards allow variation within specified ranges, but there is still a lack of clear understanding of how alternative distributions affect mechanical behaviour, degradation, and long term track performance.

### **Project objective**

The objective of the project is to evaluate how different particle size distributions influence the mechanical response and fragmentation behaviour of railway ballast, and to establish a foundation for further studies on more optimized material distributions.

### **Brief description of the methodology**

The study is based on a combination of experimental and numerical approaches:

- Large-scale sleeper push tests to investigate shear behaviour and lateral resistance
- Cyclic oedometer tests for deformation, stiffness evolution, and degradation
- Standardized ballast tests according to SS EN
- DEM simulations (Demify) for analysis of particle interactions and force transmission

Three materials were investigated: a standard distribution (M1), a wider distribution (M2), and a bimodal distribution (M3 M3.2).

### **Key results**

- Particle size distribution has a clear influence on both deformation and fragmentation
- M1 exhibits the highest permanent deformation and the greatest degree of degradation
- M2 and M3 M3.2 show lower total fragmentation
- The bimodal distribution results in relatively high fines generation despite lower total degradation
- Confinement and load level have a stronger influence on shear response than differences in particle size distribution
- DEM simulations reproduce the main trends observed in the experiments and provide a mechanistic explanation based on force distribution between particles

## **Limitations**

- Scaling of particle size distributions in the oedometer tests
- Absence of particle breakage in the DEM model
- Limited number of materials and test cases
- Simplified boundary conditions and initial packing state in the simulations

## **Future work and development potential**

The results demonstrate that the applied methodology provides a foundation for a more systematic analysis of ballast particle size distributions. The established experimental and numerical platform enables further studies where a wider range of distributions and particle properties can be investigated. This includes coupling to more representative test conditions, extended experimental setups, and further development of DEM models to better capture degradation and long term behaviour.

## Sammanfattning

Denna studie utvärderar hur kornstorleksfördelning påverkar det mekaniska beteendet och nedbrytningen hos järnvägsmakadam. Tre material har undersökts: en standardmakadam klass I (M1), en bredare kornstorleksfördelning (M2) samt en bimodal fördelning (M3/M3.2).

Projektet kombinerar storskaliga experimentella försök med numeriska simuleringar baserade på diskreta elementmetoden (DEM). Det experimentella programmet omfattar ett nyutvecklat sleeper push test för att studera sidomotstånd och skjuvbeteende, samt cykliska oedometerförsök för att utvärdera deformation, styvhetsutveckling och partikelnedbrytning. Standardiserade ballasttester har även genomförts enligt relevanta standarder.

Resultaten visar att kornstorleksfördelningen har en tydlig inverkan på både deformationsbeteende och fragmentering. Standardmakadamen (M1) uppvisar störst permanent deformation samt högst grad av krossning och omfördelning av material. De bredare och bimodala fördelningarna uppvisar en lägre total nedbrytning, även om det bimodala materialet genererar relativt mycket finmaterial, vilket indikerar en annan fragmenteringsmekanism.

I sleeper push testerna har vertikallast och inspänningsförhållanden stor påverkan på det mobiliserade motståndet. Ökad inspänning leder främst till en ökning av den skenbara kohesionen, medan friktionsvinkeln är relativt okänslig för variationer i kornstorleksfördelning. Skillnader mellan de studerade materialen kan observeras men är sekundära i förhållande till randvillkorens inverkan.

DEM-simuleringarna, utförda med programvaran Demify, återger de huvudsakliga kvalitativa trender som observerats i experimenten, inklusive kraft-deformationssamband samt relativa skillnader i deformation och styvhet mellan materialen. Simuleringarna ger även insikt i mekanismer på partikelnivå och visar hur skillnader i kraftfördelning och lastöverföring kan förklara det observerade makroskopiska beteendet. Kvantitativa avvikelser kvarstår, främst till följd av förenklingar såsom avsaknad av partikelkrossning och idealiserade initiala packningstillstånd.

Studien visar att kornstorleksfördelning är en relevant parameter som påverkar både mekanisk prestanda och nedbrytningsbeteende hos järnvägsmakadam. Den kombinerade experimentella och numeriska metodik som etablerats i arbetet utgör en grund för vidare, mer systematiska utvärderingar av ballastfördelningar, inklusive utökade provningsförhållanden samt ett bredare spann av kornstorlekar och partikelegenskaper i relation till funktion, beständighet och produktionsaspekter.

# Innehållsförteckning

Bakgrund	7
1.1 Nuvarande forskningsläge om kornstorleksfördelning hos ballast	8
1.2 Standarder och svensk praxis	9
1.3 Skillnader och motstridiga resultat i litteraturen	10
1.4 Modelleringsaspekter	12
1.5 Problemformulering	13
1.6 Syfte och mål	13
1.7 Begränsningar	14
2 Metodik	15
2.1 Övergripande metodik	15
3 Experimentellt Program	15
3.1 Material	15
3.2 Particle Size Distributions	16
3.3 Sleeper Push Test	20
3.3.1 Utveckling av testmetoden	20
3.3.2 Provningsförfarande	22
3.4 Oedometer Tester	24
3.5 Standardiserade ballasttester	25
4 Numerisk Modellering (DEM)	26
4.1 Modelleringsstrategi	26
4.2 Partikelrepresentation	26
4.3 Sleeper push-modell	27
4.3.1 Geometri och randvillkor	27
4.3.2 Implementering av pålagd last	28
4.3.3 Beräknade storheter	28
4.4 Oedometermodell	29
4.4.1 Geometri och randvillkor	29
4.4.2 Loading Implementation	30
4.4.3 Beräknade storheter	31
5 Experimentella resultat	32
5.1 Resultat från sleeper push tester	32

5.1.1	Kraft-förskjutningsbeteende	32
5.2	Karakterisering av skjuvhållfasthet	35
5.3	Resultat från oedometer-experiment	37
5.3.1	Kornstorleksfördelning och nedbrytningsindex	39
5.3.2	Absolut kumulativ förändring i kornstorleksfördelning	42
5.3.3	Marsal nedbrytningsindex	43
5.3.4	Generering av finmaterial	43
5.3.5	Tolkning av nedbrytningsindex	43
6	Simuleringsresultat	44
6.1	Sleeper Push Simulering	44
6.2	Oedometer Simulering	46
7	Jämförelse Mellan Experiment och Simulering	49
7.1	Jämförelse av kraftrespons	49
7.2	Jämförelse mellan oedometersimuleringar och experiment	50
8	Slutsatser	52
9	Rekommendationer för framtida arbete	53
10	Referenser	54

## Bakgrund

Järnvägsmakadam, dess egenskaper och dess beteende i drift är avgörande för prestanda och förväntad livslängd hos spår med ballastöverbyggnad. Ballastlagret överför laster från tåget, via räler och sliprar, till underliggande lager. Materialet måste därför uppfylla flera delvis motstridiga krav avseende hållfasthet, frostbeständighet, nötning motstånd, stabilitet, styvhet och dräneringsförmåga. Därutöver måste järnvägsmakadam kunna produceras, transporteras och hanteras effektivt från en lämplig täkt, samt installeras korrekt under och kring sliprarna i spårkonstruktionen. (Göransson, 2018; SIS, 2003).

Betraktad som ett partikulärt material beror ballastens funktion både på de enskilda partiklarnas egenskaper och på kornstorleksfördelningen i det samlade kornskelettet. Partiklarnas form, mineralogiska sammansättning samt motstånd mot fragmentering och nötning är viktiga faktorer, men kornstorleksfördelningen har också stor betydelse för hur materialet packas, hur kontakterna mellan partiklar mobiliseras och hur spänningar fördelas i kornskelettet. Den påverkar dessutom hur materialet dilaterar, sätter sig och bryts ned vid upprepad belastning. Ballastens funktion kan därför inte förstås enbart utifrån bergmaterialets kvalitet. Den behöver i stället betraktas som ett samspel mellan material och struktur, på partikel-, lager- och spårnivå. (Indraratna B. et al., 1998; Indraratna et al., 2016; Rosa et al., 2021).

Inom det svenska regelverket definieras järnvägsmakadam av klass I nominellt som 31,5/63 mm. Standarderna anger dock inte en entydig kornkurva. SS-EN 13450 (SIS, 2003) utgör produktstandard, medan TRVINFRA-00019 anger att klass I-makadam ska uppfylla kraven för antingen kornstorlekskategori E eller F. Kategori E utgör ett bredare intervall, med större tillåten andel partiklar i storleksområdet 22,4 till 31,5 mm, medan kategori F är snävare (Trafikverket, 2020). Detta är en viktig nyans: det svenska systemet medger redan en viss variation i kornstorleksfördelning inom den nominella fraktionen 31,5/63 mm. Det innebär att den nuvarande "standard" inte motsvarar en enskild, strikt definierad kornkurva, utan snarare ett begränsat variationsintervall. (SS-EN 13450:2003; TDOK 2014:0759; Göransson, 2018)

Trots en lång etablerad praxis för specifikationer är nedbrytning av ballast, igensättning av ballast, differenssättningar och variationer i styvhet fortfarande centrala orsaker till försämrade spårprestanda och ökade underhållsbehov. Ballast och underballast bryts ned genom omorientering av partiklar, nötning och igensättning, medan plötsliga styvhetsvariationer vid övergångar, växlar, korsningar, isolerskarvar och hängande sliprar förstärker hjul-rälekrafterna och påskyndar sättningar samt försämring av spår läget. Svenska erfarenheter, redovisade i litteraturen om bärighet, visar dessutom att bristande understöd ger upphov till återkommande spårgeometrifel och ökade underhållsinsatser, både i spåret och i dräneringssystemet. (Berggren, 2009; Dehlbom et al., 2018)

Det finns därför starka tekniska och ekonomiska skäl att undersöka om alternativa kornstorleksfördelningar kan ge en bättre avvägning mellan stabilitet, dräneringsförmåga, deformationsmotstånd och långsiktig beständighet än dagens praxis. Frågan är även relevant ur ett produktionsperspektiv, eftersom en bredare

kornstorleksfördelning kan förbättra utbytet från en given krossprocess, samt ur ett underhållsperspektiv, då ballast befinner sig i ett särskilt känsligt och relativt löst tillstånd direkt efter nybyggnation eller spårriktning, innan trafiken åter packat kornskelettet.

Dessa aspekter är särskilt viktiga i områden med återkommande spårjusteringar, såsom övergångszoner och växlar, där kombinationen av upprepade underhållsåtgärder och snabbt varierande understödsförhållanden kan påskynda nedbrytningen. (Berggren, 2009; Indraratna B. et al., 1998; Lundqvist & Dahlberg, 2005)

## **1.1 Nuvarande forskningsläge om kornstorleksfördelning hos ballast**

Litteraturen ger inte stöd för någon enkel regel som säger att vare sig en smalare eller en bredare kornstorleksfördelning generellt är att föredra. Ballastens beteende bestäms i stället av samspelet mellan kornstorleksfördelning, partikelform, bergart, packningsgrad, inspänning, belastningsfrekvens och belastningshistorik. En av de viktigaste slutsatserna från tillgänglig forskning är därför att en "optimal" kornstorleksfördelning är beroende av vilket funktionskriterium som prioriteras och under vilka provnings- och belastningsförhållanden detta kriterium utvärderas. (Indraratna B. et al., 1998; Indraratna et al., 2016; Rosa et al., 2021)

Storskaliga triaxialförsök av B. Indraratna, D. Ionescu och D. Christie visade att ballastens beteende vid låg inspänning skiljer sig markant från beteendet vid högre inspänning, vilket är av stor relevans för verkliga spårförhållanden där den effektiva inspänningen i ballastlagret är relativt låg. I deras studie påverkades skjuvhållfasthet och partikelkrossning främst av kornstorleksfördelning, kornens kantighet samt initial packningsgrad. De betonade också vikten av god packning i mellanrummen mellan sliprarna och i axelpartierna, eftersom inspänningen har stor betydelse för dilation, nedbrytning och ballastens övergripande respons. Deras slutsats var inte att kornstorleksfördelningen ensamt styr beteendet, utan att dess inverkan måste tolkas i samspel med packningstillstånd och inspänningsförhållanden. (Indraratna B. et al., 1998)

Vid cyklisk belastning fann B. Indraratna, Q. Sun och S. Nimbalkar (2016) en tydligt icke-monoton effekt av kornstorleksfördelningen. I deras storskaliga cykliska triaxialförsök uppvisade grövre ballastmaterial mindre axiella och radiella deformationer, medan motståndet mot plastisk deformation ökade med ökande relativ densitet. Samtidigt minskade först den permanenta axiella töjningen och volymtöjningen för att därefter öka igen med stigande likformighetskoefficient,  $C_u$ . De identifierade även två nedbrytningsregimer: en zon med hög fragmentering vid lägre  $C_u$ -värden och en zon med reducerad fragmentering när  $C_u$  översteg cirka 1.8.

Baserat på dessa resultat föreslog de en optimal kornstorleksfördelning motsvarande  $C_u$  i intervallet ungefär 1,8–2,0, med tillhörande parametrar  $\lambda = 3.0–4.4$  och  $E = 0.375–0.376$  enligt deras definitioner. Studien är särskilt viktig eftersom den inte förespråkar en så bred kornstorleksfördelning som möjligt, utan snarare en mellanliggande fördelning som balanserar deformation och nedbrytning under högfrekvent cyklisk belastning. (Indraratna, Sun & Nimbalkar, 2016.)

Rosa, Aragão och Motta (2021) breddade diskussionen genom att visa att bergart och partikelmorfologi i hög grad kan påverka effekten av kornstorleksfördelningen. I deras skalade triaxialförsök hade kornstorleksfördelningen en direkt inverkan på ballastens beteende, men responsen var också beroende av bergartstyp och partiklarnas form.

De observerade en tydlig korrelation mellan finmaterialgenerering, bergart och likformighetskoefficient (Cu), och visade att andelen material som passerar 4,75 mm och 2 mm, under deras provningsförhållanden, var mer informativa mått på nedbrytning än flera traditionella index för ballastnedbrytning. Deras DEM-baserade analys visade vidare att när packningen blev tätare ökade det totala antalet partiklar och kontakter, medan koordinationstalet minskade. De drog även slutsatsen att koordinationstalet är omvänt proportionellt mot potentialen för nedbrytning.

En viktig slutsats var att Cu ensamt inte kunde särskilja alla observerade beteenden kopplade till kornstorleksfördelning. Detta innebär att kornfördelningens bredd i sig inte är en tillräcklig beskrivning av ballastens funktionella egenskaper. (Rosa, Aragão & Motta, 2021.)

På överbyggnadsnivå kan frågan om kornstorleksfördelning inte skiljas från spårstyvhet och hur understödsförhållandena varierar längs spåret. Berggren visade att spårstyvheten påverkar bärförmåga, hjul-rälinteraktion, spårslägets kvalitet samt livslängden hos spårkomponenter. Han påpekade också att både för låg och för hög styvhet kan vara problematisk: låg styvhet leder till större rälnedböjningar och böjmoment, medan mycket hög styvhet ökar de dynamiska krafterna på sliprar och ballast. Dahlberg visade i sin tur hur plötsliga styvhetsförändringar vid övergångar, broar, växlar och liknande konstruktioner förstärker variationerna i hjul-rälkrafter och därmed påskyndar sättningar, utmattning och lokal nedbrytning. Ur detta perspektiv är kornstorleksfördelningen viktig inte bara för att den påverkar partikelkrossning, utan också för att den bidrar till spårets övergripande understödsegenskaper och graden av differenssättningar. (Berggren, 2009; Lundqvist & Dahlberg, 2005)

Sammantaget visar det nuvarande forskningsläget att kornstorleksfördelningen hos ballast påverkar järnvägens funktion genom minst fyra samverkande mekanismer: packning och inlåsning mellan partiklar, dräneringsförmåga och förmåga att hantera finmaterial, fördelning av kontaktkrafter och därmed nedbrytning, samt styvhets- och sättningsbeteende i spårets understödssystem. En tekniskt välgrundad utvärdering av alternativa kornstorleksfördelningar bör därför långsiktigt omfatta både ballastens beständighet och spårets funktion på systemnivå.

## **1.2 Standarder och svensk praxis**

Det svenska regelverket gör en tydlig funktionell åtskillnad mellan det grova ballastlagret i spårets överdel och de mer brett graderade underballastlagren under detta. Göransson beskriver ballastlagret som ett grovt krossmaterial, normalt i storleksintervallet 31,5–63 mm, vars funktion är att säkerställa lastöverföring, dränering, friktionsbaserad stabilitet samt tillräcklig elasticitet i systemet mellan sliper och ballast.

Underballasten, däremot, har en betydligt bredare kornstorleksfördelning, typiskt omkring 0/150 mm, och är avsedd att fördela trafiklast, säkerställa dränering i

spårbädden, skydda undergrunden mot erosion samt begränsa sättningar och tjälpåverkan. Denna uppbyggnadsprincip är i linje med AMA Anläggning, där välgraderade underballastmaterial föreskrivs för förstärkning och tjälisolering. (Göransson, 2018; AMA Anläggning 20, DCH.15–DCH.16.)

I Trafikverkets nuvarande regelverk (Trafikverket, 2020) formaliseras denna uppdelning genom tydliga krav på ballastens geometri, form och finmaterialhalt. För ballast av klass I är den nominella kornstorleken fortsatt 31,5/63 mm, med mycket låg tillåten finhalt ( $\leq 0,5\%$ ) samt explicita krav på partiklarnas form genom LT-index, vilket speglar behovet av en grov, öppen och väl sammanlåst struktur. Samtidigt medger regelverket två kornstorlekskategorier inom denna fraktion, E och F. Kategori E tillåter en bredare kornstorleksfördelning med en större andel partiklar i det mellanliggande storleksintervallet (till exempel upp till 25 % som passerar 31,5 mm), medan kategori F är snävare graderad med striktare begränsningar för dessa fraktioner.

Denna uppdelning i kornstorlekskategorierna E och F fanns redan i TDOK 2014:0759 (Trafikverket, 2015) och har förts vidare till det nuvarande regelverket. Den är tekniskt betydelsefull eftersom den visar att den svenska standarden inte föreskriver en enskild kornstorleksfördelning, utan i stället definierar ett tillåtet variationsutrymme inom samma nominella ballastprodukt. Med andra ord betraktas både relativt snäva och relativt breda kornstorleksfördelningar som acceptabla, förutsatt att de uppfyller funktionskraven avseende dränering, mekanisk stabilitet och beständighet.

Sammantaget fungerar SS-EN 13450 och Trafikverkets regelverk i första hand som ett system för produktkvalitet och verifiering av kravuppfyllelse, snarare än som en mekanistisk dimensioneringsregel. Standarderna anger provningsmetoder, acceptansgränser och kategorier, men överlåter åt beställare och projekterande att välja lämpliga egenskaper för den aktuella tillämpningen. Att både kornstorlekskategori E och F tillåts inom ballast av klass I understryker att det inte finns någon universellt optimal kornstorleksfördelning oberoende av belastningsförhållanden, underbyggnad, klimat och underhållsstrategi.

En rimlig tolkning av det svenska skiktade regelverket är att det medvetet skiljer funktionerna hos det öppna, dränerande ballastlagret från de mer brett graderade, lastfördelande lagren under. Detta har direkta implikationer för föreliggande projekt. Om kornstorleksfördelningen i ballastlagret görs alltför bred kan den funktionella gränsen mellan ballast och underballast börja suddas ut, särskilt vad gäller dräneringsförmåga, packningsegenskaper vid spårriktning och migration av finmaterial. Om fördelningen i stället är alltför snäv kan kontaktspänningarna öka och därmed även den lokala partikelkrossningen, särskilt under cyklisk belastning. Det praktiska dimensioneringsutrymmet begränsas därför inte enbart av mekanismer på partikelnivå, utan också av hur regelverket fördelar olika funktioner mellan lagren i spårkonstruktionen. Det är just därför frågan om en optimal kornstorleksfördelning för ballast fortfarande är öppen, trots långvarig standardisering.

### **1.3 Skillnader och motstridiga resultat i litteraturen**

En första tydlig skillnad i litteraturen rör frågan om en bredare kornstorleksfördelning är fördelaktig eller nackdelaktig. Å ena sidan visar den cykliska ballastlitteratur som

sammanställts av Indraratna, Sun och Nimbalkar att en bredare kornstorleksfördelning ofta har föreslagits förbättra inlåsningen mellan partiklar. Å andra sidan visade tidigare storskaliga studier av Indraratna, Ionescu och Christie att ballast med bredare gradering och hög packningsgrad kan uppvisa ökad nedbrytning vid belastning. Den senare cykliska studien nyanserade bilden ytterligare genom att visa att sambandet är icke-monotont: nedbrytningen är hög vid låga Cu-värden, minskar när Cu överstiger cirka 1.8, men deformationen fortsätter inte att förbättras obegränsat med ökande kornstorleksbredd. Den praktiska implikationen är att "bredare" inte utgör en tillräcklig dimensioneringsprincip. Den avgörande frågan är i stället hur bred kornstorleksfördelningen bör vara, vid vilken packningsgrad och under vilka belastningsförhållanden. (Indraratna, Ionescu & Christie, 1998; Indraratna, Sun & Nimbalkar, 2016.)

En andra tydlig skillnad i litteraturen rör frågan om kornstorleksfördelning kan betraktas som den dominerande variabeln. Svenska standarder och tillämpad praxis lägger naturligt stor vikt vid kornkurvor, nominella fraktioner och uppfyllande av olika kategorier. Samtidigt visar Rosa, Aragão och Motta att bergart och partikelmorfologi i hög grad kan påverka nedbrytningsbeteendet, och att Cu ensamt inte kan förklara alla observerade beteenden kopplade till kornstorleksfördelning i deras studie. Med andra ord kan en kornstorleksfördelning som fungerar väl för en viss bergart uppvisa helt andra egenskaper för en annan, även om siktcurvan nominellt sett är likartad. Detta innebär att en standardbaserad syn på kornstorleksfördelning behöver kompletteras med ett materialspecifikt perspektiv, där även motstånd mot nedbrytning och partiklarnas form beaktas. (Rosa, Aragão & Motta, 2021; Göransson, 2018.)

En tredje tydlig skillnad i litteraturen rör skala och metodik. Rosa, Aragão och Motta påpekar uttryckligen att skalning av ballast för småskaliga försök inte är entydigt accepterad i litteraturen, eftersom mindre partiklar kan kräva en annan specifik brottenergi och inte nödvändigtvis återger brottmekanismerna i full skala. De två studierna av Buddhima Indraratna med medförfattare som refereras här baseras däremot på storskaliga triaxialförsök och ligger därmed närmare verkliga partikelstorlekar. Litteraturen uppvisar därför en viktig intern konsekvens: den visar återkommande att slutsatser om kornstorleksfördelning är beroende av hur väl provkroppens skala, belastningsförlopp och inspänningsförhållanden representerar verkliga spårförhållanden. Till synes motstridiga resultat mellan studier kan därmed i lika hög grad bero på metodologiska skillnader som på faktiska fysikaliska motsättningar. (Indraratna, Ionescu & Christie, 1998; Indraratna, Sun & Nimbalkar, 2016; Rosa, Aragão & Motta, 2021.)

En fjärde tydlig skillnad i litteraturen rör skillnaden mellan ballastens beständighet och spårets funktion på systemnivå. En kornstorleksfördelning som minimerar nedbrytning i ett triaxialförsök är inte nödvändigtvis den som minimerar spårlägesförsämring i fält, eftersom spårets prestanda även beror på understödsstyvhet, styvhetsövergångar, dräneringens utveckling över tid samt frekvensen av spårriktning. Berggren och Dahlberg visar båda att både för hög och för låg styvhet, liksom plötsliga styvhetsvariationer, kan vara skadliga, om än via olika mekanismer.

Detta innebär att den "bästa" kornstorleksfördelningen inte kan identifieras enbart utifrån partikelkrossning. Den måste även utvärderas med avseende på sättningar, sidomotstånd, spårstyvhetens beteende samt robusthet ur ett underhållsperspektiv. (Berggren, 2009; Dahlberg, 2010.)

## 1.4 Modelleringsaspekter

Diskreta elementmetoden (DEM) har blivit ett allt viktigare verktyg för att studera det mekaniska beteendet hos järnvägsmakadam, eftersom metoden möjliggör en explicit beskrivning av partikelinteraktioner, kraftöverföring och nedbrytningsmekanismer på kornnivå. En central utmaning i DEM-modellering av ballast är hur partiklarnas form representeras, vilket har visat sig ha stor betydelse för inlåsning, dilatans och skjuvhållfasthet. Tidiga studier använde ofta sfäriska partiklar av beräkningstekniska skäl, medan senare arbeten har betonat behovet av icke-sfäriska representationer, såsom kluster (clumps) eller polyedriska partiklar, för att bättre återge verkligt beteende. En ökad formrealism innebär dock också ökad modellkomplexitet och större krav på kalibrering, särskilt vad gäller kontaktdetektering, styvhetsskalning och beräkningstid.

Utöver partiklarnas form är val och kalibrering av kontaktmodeller avgörande för DEM-simuleringar av ballast. Vanligt förekommande formuleringar, såsom Hertz–Mindlin-baserade kontaktlagar med friktionsglidning, ger en rimlig första approximation, men deras tillämpbarhet på starkt kantiga, grova och potentiellt krossbara material är fortfarande inte fullt klarlagd. Kalibrering sker vanligtvis mot laboratorieförsök, oftast direkta skjuvförsök eller triaxialförsök, där relativt standardiserade dataset finns tillgängliga. Däremot saknas i stor utsträckning välkontrollerade experimentella data för andra belastningsfall, exempelvis interaktion mellan sliper och ballast, särskilt i ett svenskt sammanhang. Detta begränsar möjligheten att entydigt kalibrera och validera DEM-modeller för de randvillkor och spänningsvägar som är relevanta för järnvägstillämpningar.

Denna kunskapslucka motiverar behovet av kombinerade experimentella och numeriska studier där DEM-modeller utvecklas parallellt med noggrant kontrollerade fysiska försök. Genom att etablera högkvalitativa dataset för exempelvis sleeper push tester blir det möjligt att inte bara studera effekten av kornstorleksfördelning, utan även de samverkande effekterna av partikelform, morfologi och hållfasthet under realistiska belastningsförhållanden. Ett sådant angreppssätt möjliggör en djupare, mekanistisk förståelse av ballastens beteende, men ställer samtidigt höga krav på experimentell reproducerbarhet, mätupplösning och materialkaraktisering för att simuleringarna ska kunna valideras på ett meningsfullt sätt och användas i prediktivt syfte.

## 1.5 Problemformulering

Med utgångspunkt i nuvarande forskningsläge, standarder och ingenjörsexpraxis kan följande centrala forskningsfrågor identifieras:

*Finns det en mer optimal kornstorleksfördelning för järnvägsbakad, och under vilka förutsättningar?*

- Nuvarande standarder definierar tillåtna intervall för kornstorleksfördelning, men anger ingen entydigt optimal lösning. Ballastens funktion bestäms av ett komplext samspel mellan kornstorleksfördelning, partikelform, bergart, packningstillstånd och belastningsförhållanden. Samtidigt formuleras krav på prestanda i allt högre grad i termer av funktionella egenskaper, såsom deformationsmotstånd, beständighet, dräneringsförmåga och underhållsintervall, i linje med Trafikverkets syn på infrastrukturdesign och materialspecifikation. Detta väcker frågan om alternativa kornstorleksfördelningar, potentiellt anpassade till specifika materialkällor eller tillämpningar (till exempel övergångszoner, höghastighetsbanor eller underhållsintensiva sträckor), kan ge bättre långsiktig prestanda än dagens praxis.

*Hur kan en sådan optimal eller nära optimal kornstorleksfördelning identifieras på ett vetenskapligt och praktiskt robust sätt?*

- Ur både forsknings- och ingenjörsperspektiv är detta en komplex utmaning. Ballastens beteende uppstår genom samverkande mekanismer på flera skalnivåer, vilka är svåra att isolera både experimentellt och numeriskt. Designutrymmet är högdimensionellt och omfattar kornstorleksfördelningens form, finhalt, partikelform och materialets hållfasthet, samtidigt som det begränsas av produktionsmässiga förutsättningar och standardkrav. Traditionella empiriska angreppssätt och enskilda laboratorieförsök är otillräckliga för att systematiskt utforska detta utrymme.

Detta motiverar en kombinerad metodik där kontrollerade experiment och avancerade numeriska simuleringar (DEM) används parallellt för att generera validerade dataset och möjliggöra mekanistisk tolkning. Ett sådant angreppssätt skapar förutsättningar för att gå från standardbaserade kornstorleksintervall till prestandabaserad och potentiellt optimerad materialdesign.

## 1.6 Syfte och mål

Det övergripande syftet med detta projekt är att genomföra en initial utvärdering av hur olika skalade kornstorleksfördelningar påverkar det mekaniska beteendet och nedbrytningen hos järnvägsbakad.

Experimentella mål omfattar:

- Att utforma och testa ett begränsat antal representativa kornstorleksfördelningar

- Att kvantifiera deformation, kraftrespons och partikelkrossning
- Att jämföra beteendet mellan oedometerförsök och sleeper push tester

Numeriska mål omfattar:

- Att etablera grundläggande DEM-modeller motsvarande de experimentella uppställningarna
- Att påvisa kvalitativ överensstämmelse mellan simuleringar och experiment
- Att skapa en grund för framtida kalibrerade och prediktiva simuleringar

Studien är uttryckligen avsedd som en första utvärdering, där ett begränsat antal kornstorleksfördelningar analyseras. Ett centralt resultat är därför inte enbart de experimentella observationerna i sig, utan även utvecklingen av validerade DEM-modelleringsramverk. När sådana modeller etablerats för flera olika provningskonfigurationer möjliggör de en systematisk utforskning av ett betydligt större parameterrum av kornstorleks- och formfördelningar i framtida studier.

## 1.7 Begränsningar

Vid tolkning av resultaten bör följande begränsningar beaktas.

### Skaleffekter:

Oedometerförsöken baseras på skalade kornstorleksfördelningar, vilket innebär att vissa mekanismer, särskilt kopplade till partikelkrossning och kontaktpänningar, inte fullt ut representerar fullskaligt beteende. Skalningen är en följd av provkroppens begränsade storlek (170 mm diameter), men bevarar kornkurvas form och tillämpas konsekvent i både experiment och DEM-simuleringar.

För sleeper push testerna används däremot kornstorleksfördelningar utan geometrisk skalning i simuleringarna, vilket möjliggör direkt jämförelse med fullskaliga försök.

### Förenklingar i DEM:

Det numeriska arbetet har begränsats till grundläggande modeller och ett mindre antal simuleringar. Modellerna återger de dominerande mekanismerna, men inkluderar inte alla relevanta processer, särskilt inte partikelkrossning.

Trots detta representerar modellerna en hög detaljnivå, med polyedriska partiklar och storskaliga GPU-beräkningar. Samtidigt är randvillkor och geometrier idealiserade, vilket begränsar möjligheten att återge långsiktig nedbrytning och finmaterialgenerering. Vidareutveckling, exempelvis med explicita brottmodeller, utgör en tydlig möjlighet framåt.

### Experimentella begränsningar:

Antalet studerade kornstorleksfördelningar och upprepningar är begränsat, främst av praktiska skäl kopplade till materialproduktion, transport och testkapacitet. I praktiken kan endast ett fåtal material provas per testkampanj.

En mer omfattande och systematisk studie av variationer i kornstorleksfördelning och bergarter ligger därför utanför denna studies ram, men utgör en viktig riktning för framtida arbete.

## 2 Metodik

### 2.1 Övergripande metodik

Projektet bygger på en kombinerad experimentell och numerisk ansats för att utvärdera hur kornstorleksfördelning påverkar det mekaniska beteendet hos järnvägs makadam. Metodiken integrerar kontrollerade laboratorieförsök, storskaliga fysiska tester och simuleringar med diskreta elementmetoden (DEM) för att ge både empirisk och mekanistisk förståelse av ballastens beteende.

Arbetet är uppdelat i fyra huvudsteg:

- Materialdefinition – Framtagning och karakterisering av ballastmaterial med olika kornstorleksfördelningar, inklusive standard-, bredare och bimodala fördelningar.
- Experimentella försök – Utvärdering av mekaniskt beteende genom storskaliga sleeper push tester, cykliska oedometerförsök samt kompletterande standardiserade ballasttester.
- DEM-modellering – Uppbyggnad av numeriska modeller baserade på de experimentella uppställningarna samt kalibrering mot uppmätta data.
- Jämförelse och analys – Jämförelse mellan experimentella och numeriska resultat för att bedöma hur kornstorleksfördelning påverkar styvhet, deformation och nedbrytning.

## 3 Experimentellt Program

### 3.1 Material

Materialen producerades av NCC Industry vid tälten i Hemmesjö utanför Växjö. Valet av tält baserades på närheten till Dynapacs testanläggning i Karlskrona, vilket möjliggjorde effektiv transport och hantering.

Följande ballasttyper producerades och provades:

- M1: Standard järnvägs makadam klass I
- M2: Bredare och mindre grov ballast, framställd genom modifierad krossning och siktning
- M3: Bimodal fördelning bestående av M1-material blandat med en extra grov fraktion
- M3.2: Kontrollerad bimodal fördelning med 10 viktprocent av fraktionen 8–11,2 mm tillsatt till M1

Det bimodala materialet (M3.2) framställdes genom vägning av respektive materialandel och blandning på asfaltytan utanför testanläggningen för att säkerställa en kontrollerad sammansättning.

Materialen (35 ton per typ) transporterades till testplatsen med ballastlastbilar och placerades i testkanalen med hjullastare och grävmaskin. Särskild hänsyn togs för att minimera segregering under hanteringen.

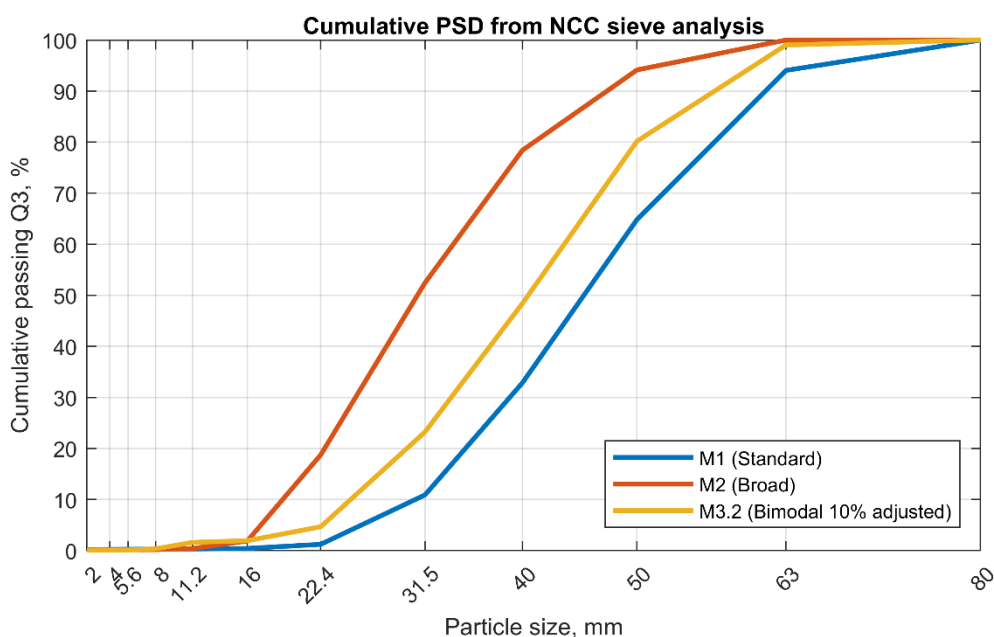
Efter utläggning jämnades ytan av med grävmaskin och manuellt med räfsor. Materialet packades därefter med en Dynapac CA3500 vält genom två statiska överfarter.

Kanalens geometri dokumenterades med 3D-laserskanning (FARO-system) före fyllning, efter fyllning samt efter packning, vilket möjliggjorde detaljerad uppföljning av materialfördelning och sättningar.

### 3.2 Partikelstorleksfördelning

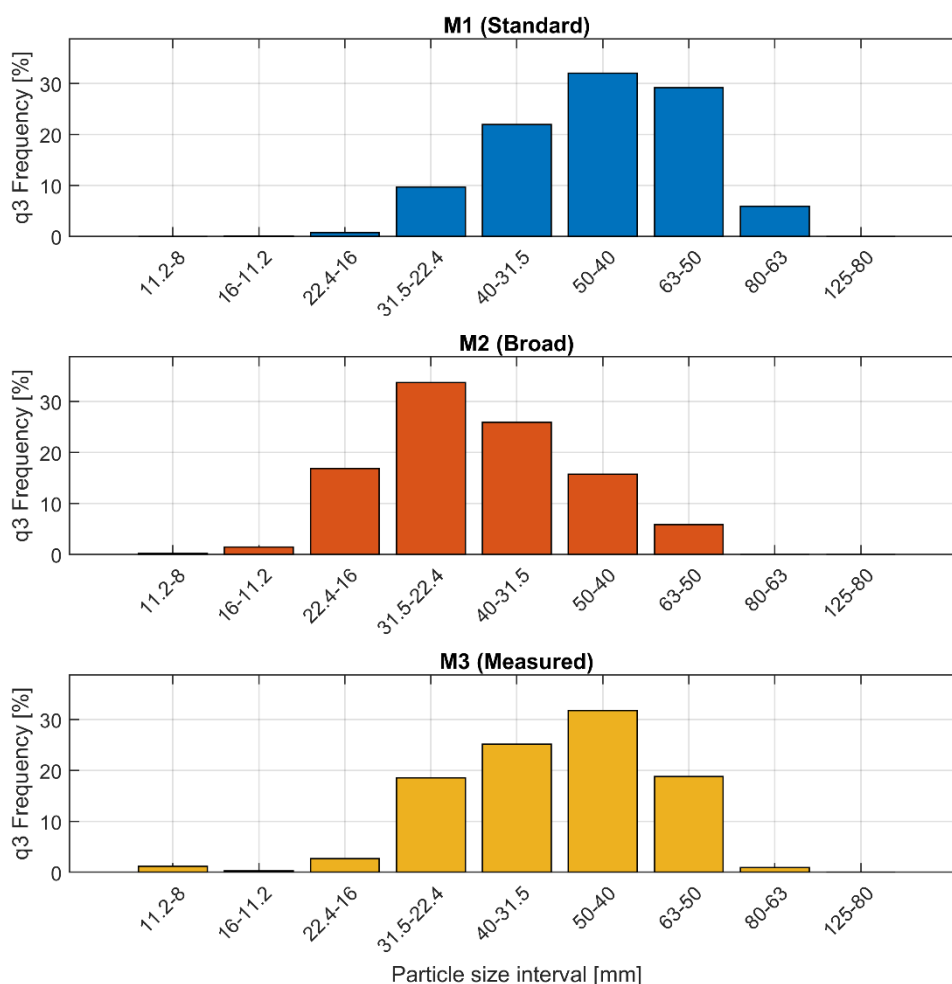
Siktanalyser genomfördes vid NCC:s väglaboratorium i Hissings Kärra, för att bestämma kornstorleksfördelningen hos de undersökta ballastmaterialen (M1–M3), se Figur 1. Standardiserade siktmetoder tillämpades, och den kumulativa passerande andelen (Q3) bestämdes för respektive material över aktuellt storleksintervall.

De motsvarande massbaserade frekvensfördelningarna (q3) redovisas som histogram i Figur 2, vilket ger en kompletterande bild av kornstorleksfördelningen i diskreta storleksintervall. Denna representation underlättar jämförelse av olika fraktioners relativa bidrag mellan materialen.



Figur 1. Kornstorleksfördelning för M1, M2 och M3 baserad på provtagning från materialbäddarna efter genomförda försök.

Som komplement redovisas även centrala graderingsparametrar i Tabell 1, inklusive karakteristiska kornstorlekar (D10, D30, D60), likformighetskoefficient ( $C_u$ ), krönningskoefficient ( $C_c$ ) samt  $\lambda$ . Dessa parametrar ger en kvantitativ beskrivning av skillnaderna mellan materialen och underlättar jämförelser mellan kornkurvornas form och bredd.



Figur 2. Kornstorleksfördelningar uttryckta som massbaserad frekvens ( $q_3$ ) för de ursprungliga ballastmaterialen från NCC över 8 mm. M1 (standardfördelning) uppvisar en grovdominerad fördelning med en topp i intervallet 40–63 mm. M2 (bred fördelning) visar en större spridning med ökad andel mellanstora fraktioner. M3 (uppmätt) uppvisar en något jämnare fördelning med reducerad grovfraktion och ökat innehåll av mellanstora partiklar. Det bör noteras att den uppmätta fördelningen för M3 inte motsvarar den avsedda bimodala blandningen med 10 % av fraktionen 8–11,2 mm.

De beräknade graderingsparametrarna visar tydliga skillnader mellan materialen som kan relateras till de mekanismer som lyfts i litteraturstudien. M1 uppvisar ett relativt lågt  $C_u$  ( $\approx 1.6$ ), vilket indikerar en smal kornstorleksfördelning. Detta är i linje med tidigare resultat där smala fördelningar kopplats till högre kontaktpänningar och ökad risk för partikelkrossning, vilket också överensstämmer med de observerade trenderna för standardballast.

M2 och M3 har något högre  $C_u$ -värden ( $\approx 1.75$ – $1.80$ ), vilket placerar dem nära det intervall ( $C_u \approx 1.8$ – $2.0$ ) som i litteraturen identifierats som potentiellt gynnsamt med avseende på balans mellan deformation och nedbrytning. Detta tyder på att dessa

material kan uppvisa förbättrad packning och kraftfördelning utan att samtidigt driva kraftigt ökad fragmentering.

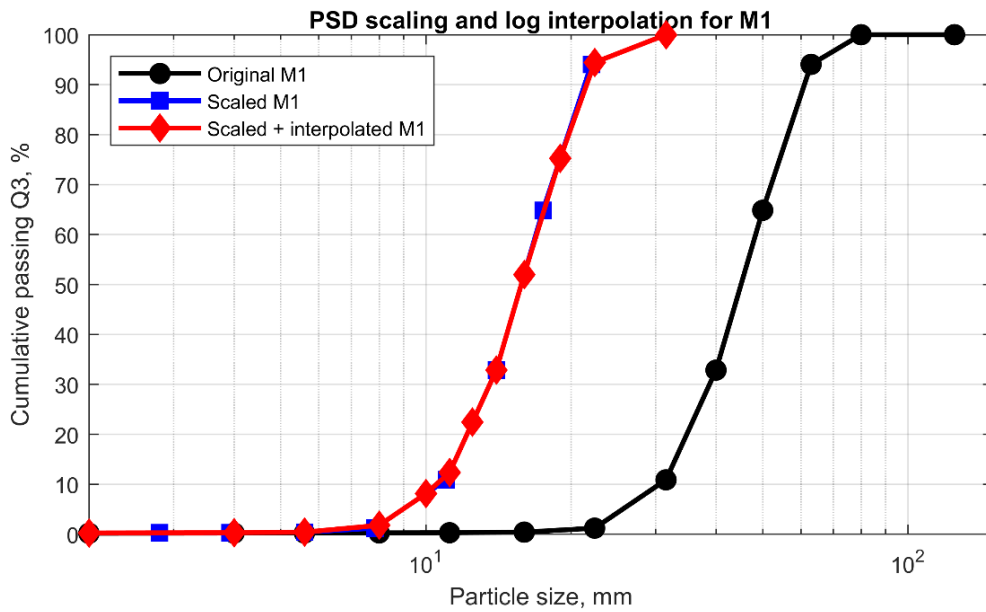
M3.2 avviker tydligt med ett högt Cu ( $\approx 4.2$ ) och även ett förhöjt Cc, vilket speglar den bimodala fördelningen. Enligt litteraturen innebär detta inte nödvändigtvis förbättrad prestanda, utan kan snarare leda till förändrade nedbrytningsmekanismer, exempelvis ökad generering av finmaterial trots lägre total krossning. Detta är konsistent med tidigare observationer att breda eller bimodala fördelningar inte kan bedömas enbart utifrån Cu, utan kräver tolkning i termer av packningsstruktur och kontaktnätverk.

Tabell 1. Graderingsparametrar för de olika materialen.

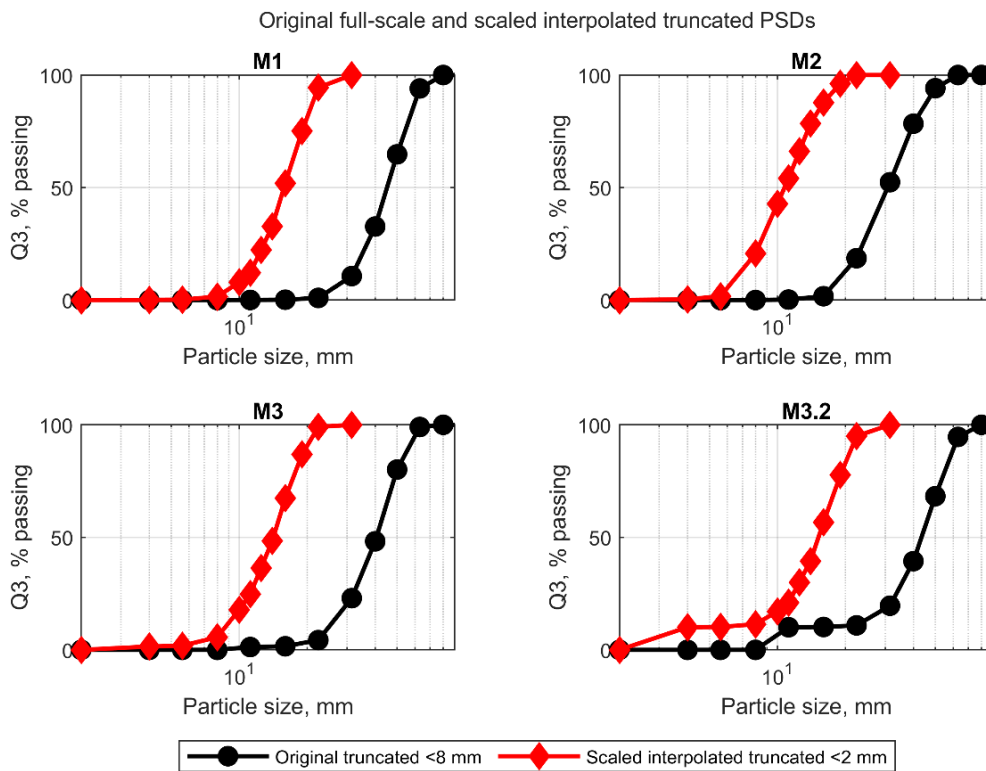
Material	D10 [mm]	D30 [mm]	D60 [mm]	Cu -	Cc -	$\lambda$ -
M1	30.521	38.779	48.337	1.5837	1.0193	2.534
M2	18.814	25.101	33.765	1.7947	0.9918	1.7998
M3	24.706	33.588	43.391	1.7563	1.0524	1.854
M3_2	11.097	35.632	46.862	4.2231	2.4415	1.9805

För oedometerförsöken är det inte möjligt att använda ballast med verklig toppstorlek på 63–80 mm. Därför tillämpades en skalningsmetod där kornstorleksfördelningen reducerades till en toppstorlek på 22.4 mm. Den ursprungliga kornstorleksfördelningen (PSD) skalades geometriskt för att anpassas till det aktuella storleksintervallet i laboratorieförsöken. Detta gjordes genom att tillämpa en konstant skalningsfaktor på partikelstorlekarna, samtidigt som den kumulativa passerande andelen (Q3) bevarades. Endast det fysikaliskt relevanta storleksintervallet skalades, medan partiklar utanför det aktuella området exkluderades.

Efter skalningen interpolerades kornstorleksfördelningen till en fördefinierad uppsättning siktstorlekar med hjälp av linjär interpolation i logaritmisk partikelstorleksskala. Denna metod säkerställer en jämn och fysikaliskt konsistent omfördelning av massan mellan storleksklasser, samtidigt som den övergripande formen på den ursprungliga fördelningen bevaras. En illustration av tillvägagångssättet visas i Figur 3, och de resulterande skalade och interpolerade kornstorleksfördelningarna för samtliga undersökta material presenteras i Figur 4.



Figur 3. Illustration av skalnings- och interpolationsförfarandet för att ta fram skalade prov för oedometerförsöken.



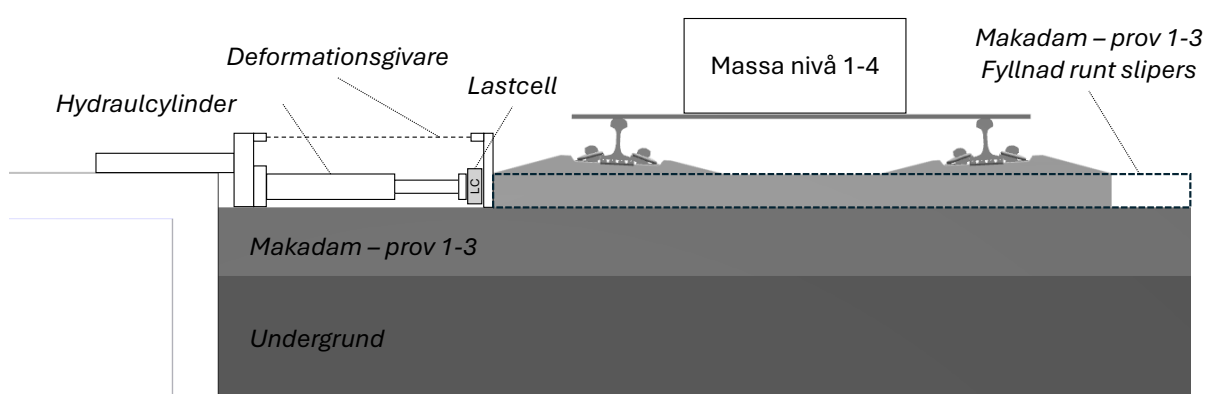
Figur 4. Ursprungliga och skalade kornstorleksfördelningar (PSD) för samtliga undersökta material (M1, M2, M3, M3.2). De ursprungliga, trunckerade fördelningarna (svart) jämförs med de geometriskt skalade och interpolerade fördelningarna (röd), anpassade till det reducerade storleksintervallet för oedometerförsöken. Skalningen bevarar kornkurvornas övergripande form, samtidigt som den övre storleksdelen kapas och massan omfördelas konsistent mellan storleksklasser.

### 3.3 Sleeper Push Test

#### 3.3.1 Utveckling av testmetoden

Sleeper push testet utvecklades för att utvärdera alternativa kornstorleksfördelningar för järnvägsmakadam under kontrollerade men representativa förhållanden. Syftet var att fånga ballastens mekaniska respons vid lateral belastning, samtidigt som provuppställningen möjliggör väl definierade randvillkor och god reproducerbarhet. En schematisk översikt av testuppställningen visas i Figur 5, där det hydrauliska lastsystemet, den centrala slipern, ballastlagret (material M1–M3), underbyggnaden samt applicerade vertikala lastnivåer framgår.

I litteraturen genomförs sleeper push tester ofta med en enkel hydraulisk kraft och manuell pump. Även om detta är en kostnadseffektiv lösning medför det begränsad kontroll och reproducerbarhet, eftersom friktion återaktiveras vid varje laststeg. För att undvika detta användes i stället ett hydrauliskt system som hyrdes från Walleverken.



Figur 5. Schematisk illustration av sleeper push testets uppställning, som visar det hydrauliska lastsystemet som verkar på den centrala slipern, ballastlagret (material M1–M3), underbyggnaden samt applicerade vertikala lastnivåer.

Testuppställningen baserades på tre A32-sliprar med ett centrumavstånd på 600 mm (Figur 6). Valet av tre sliprar motiverades av behovet av en stabil konstruktion samt möjligheten att applicera last på den mittersta slipern. En konfiguration med en sliper försvårar applicering av vertikallast, medan två sliprar skulle kräva en mer komplex lastintroduktion mellan sliprarna.

Lastsystemet konstruerades och installerades av ingenjörsteamet på Dynapac. En svetsad plåtkonstruktion utvecklades för att överföra lasten från den hydrauliska cylindern till betongkanten i testkanalen, samtidigt som höjdjustering möjliggjorde korrekt linjering mellan cylinder och lastcell. Uppställningen, inklusive hydrauliskt system

och sensorer, visas i Figur 7. En cylindrisk lastcell monterades på den mittersta slipern och kopplades till cylinderns kolv via en led.



Figur 6. Bild av A32-sliprar. Höger: Sektion med monterad 60E1-räl och befästningssystem.

En central utmaning under förtesterna var att säkerställa att lasten applicerades i en strikt parallell riktning. Detta löstes genom att placera två lika långa träbalkar mellan betongkanten och de yttre sliprarna. En laserlinje användes därefter för att justera systemet ortogonalt genom centrum av cylinder, lastcell och sliper, med referens mot motsatt betongvägg. Mindre vinkelavvikelser registrerades för varje test, och avståndet mellan yttersta sliprar och betongkant mättes efter varje prov.

Efter utläggning av material (Figur 8) packades ballastlagret med vält. Olika randvillkor studerades, inklusive okonfinerad (C1) och konfinerad (C2) konfiguration, vilka illustreras i Figur 9. Vidare varierades lastförhållandena genom olika vertikala lastnivåer, där exempelvis lastfall R4 med tre betongblock visas i Figur 10. Samma figur visar även ett exempel på punktmoln från 3D-laserskanning, vilket användes för att analysera deformationer och materialfördelning.



Figur 7. Den utvecklade uppställningen för att fixera och rikta den hydrauliska cylindern. Höger: Komplet systemuppställning med hydrauliksystem och sensorer.



Figur 8. Kanal fylld med material M1–M3 före statisk packning. Höger: Under statisk packning med vält.



Figur 9. Exempelbild av den okonfinerade C1-konfigurationen. Höger: Exempelbild av den konfinerade C2-konfigurationen.



Figur 10. Testupställning i lastfall R4 med tre betongblock. Höger: Exempelbild från 3D-laserskanningens punktmoln.

### 3.3.2 Provningsförfarande

Materialet transporterades till testplatsen och placerades i kanalen med hjullastare och grävmaskin. Särskild hänsyn togs för att minimera kornseparation under hanteringen. M3-materialet framställdes genom vägning av de ingående fraktionerna och blandning på en asfaltyta utanför testanläggningen.

Efter utläggning jämnades ytan av med grävmaskin och manuellt med räfsor, varefter materialet packades med en Dynapac CA3500 vält genom två statiska överfarer.

Testkanalen laserskannades med ett FARO-system från sex positioner före utläggning, efter fyllning samt efter packning.

Fyra Geokon 3515 jordtrycksgivare installerades under ballastlagret. Givarna placerades för att registrera spänningar under räls-slipar-befästningarna, med fokus på området under den mittersta slipern. På grund av begränsat antal givare placerades även sensorer under de yttre sliprarna på större avstånd.

Varje test genomfördes enligt följande procedur:

- Positionering och justering av riggen med hjälp av laserlinje för att säkerställa parallellitet
- Vid konfigurerad konfiguration (C2), justering av ballast i skuldra och sidor
- Placering av betongblock för vertikallast (R02–R04)
- Anslutning av hydraulcylinder och deformationsgivare
- 3D-laserskanning av initialtillstånd
- Start av datainsamling och videoinspelning
- Applicering av triggersignal för synkronisering
- Lastning med hydrauliskt system
- Avslut av test vid cirka 50 mm förskjutning
- Avslut av datainsamling och inspelning
- Slutlig 3D-laserskanning
- Frånkoppling av utrustning
- Uppmätningkontroll av yttre sliprars position

Den vertikala lasten i sleeper push testerna applicerades genom en kombination av egenvikt från sliper-räl-systemet och diskreta betongmassor placerade ovanpå rälerarna. Detta möjliggör en kontrollerad variation av normallasten på ballastlagret och därmed en systematisk analys av inspänningens inverkan på skjuvmotstånd och deformation.

Lasten ökades stegvis i fyra definierade lastfall (R01–R04), där varje steg motsvarar tillägg av ett betongblock med en massa på cirka 1,1 ton, se Tabell 2. Referensfallet (R01) motsvarar egenvikten från sliprar och räler, medan efterföljande fall ger successivt ökande vertikala spänningar.

*Tabell 2. Applicerade vertikala lastkonfigurationer för sleeper push testerna. Total massa och motsvarande vertikal kraft redovisas för respektive lastfall (R01–R04), där lasten ökas stegvis genom att betongblock (1,1 ton styck) placeras ovanpå sliper-räl-systemet. Referensfallet (R01) motsvarar egenvikten från sliprar och räler.*

Load case	Number of concrete blocks	Total mass [kg]	Total force [N]	Description
R01	0	1072.2	10 526	Sleeper + rails only (baseline)

Load case	Number of concrete blocks	Total mass [kg]	Total force [N]	Description
R02	1	2172.2	21 309	Sleeper + rails + 1 concrete block
R03	2	3272.2	32 092	Sleeper + rails + 2 concrete blocks
R04	3	4372.2	42 875	Sleeper + rails + 3 concrete blocks

### 3.4 Oedometer Tester

Oedometerförsöken genomfördes med en Instron 400RD provningsutrustning. Ballastmaterialet placerades i en styv cylindrisk behållare (Figur 11), vars dimensioner redovisas i Tabell 3. Provkroppen var lateralt inspänd av cylinder-väggarna, medan vertikal last applicerades via en styv belastningsplatta. Uppställningen säkerställer endimensionella kompressionsförhållanden, där radiell deformation förhindras och partikelomlagring sker huvudsakligen i vertikal riktning.

En monoton vertikal last applicerades med en konstant lastökning på 125 kPa/s upp till en maximal spänning på 500 kPa. Belastningen genomfördes utan avlastningsfaser, vilket ger en konsekvent spänningsväg för samtliga material. Den valda lastnivån representerar en avvägning mellan rimlig provtid och begränsning av hastighetsberoende effekter.

Den applicerade vertikala lasten och motsvarande deformation registrerades kontinuerligt under försöken. Baserat på dessa mätningar bestämdes spännings-töjningssamband, vilket möjliggör utvärdering av materialens kompressibilitet och styvhet. Resultaten ger även underlag för jämförelse av deformationsbeteendet mellan olika kornstorleksfördelningar.



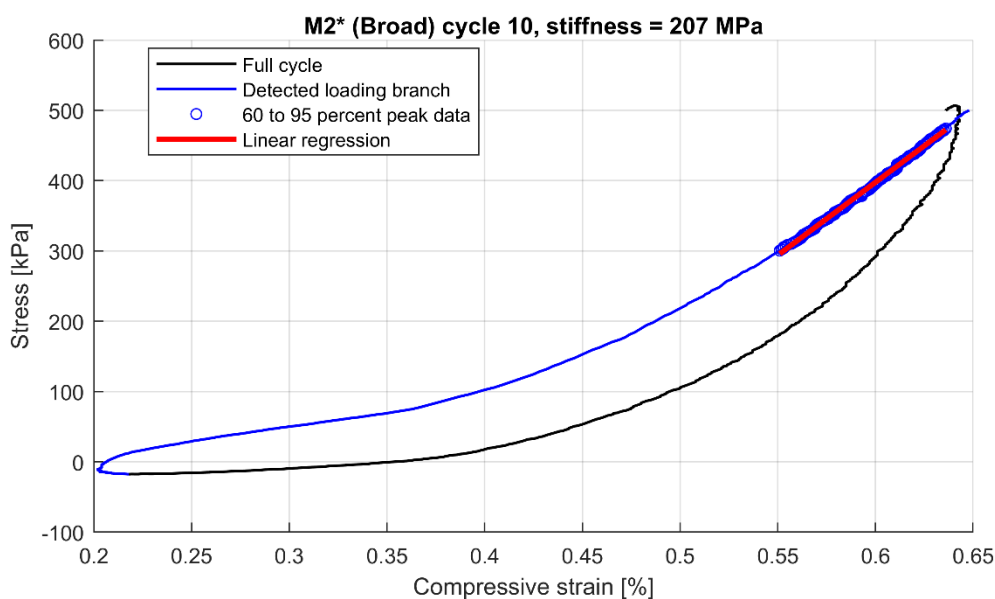
Figur 11. Foto av testcylindern med preparerat prov (vänster) samt under belastning i Instron 400RD (höger).

Tabell 3. Dimensioner för oedometerutrustningen

Dimension	Parameter	Värde	Enhet
Höjd på cylindrisk behållare	$h$	0.095	m
Diameter på cylinder/kolv	$d$	0.17	m
Kolvens bottenarea	$a$	0.0227	m <sup>2</sup>

Volym i oedometercylindern	$V$	$2.15 \times 10^3$	$\text{m}^3$
Kolvens massa	$m$	22	kg
Kolvens egenvikt	$F_{mg}$	215	N

För att erhålla ett representativt mått på styvheten utvärderades spännings-töjnings sambandet i området nära toppspänningen. För varje lastcykel identifierades lastgrenen, och en linjär regression applicerades på data inom intervallet 60–95 % av maximal spänning. Detta tillvägagångssätt ger en robust och jämförbar uppskattning av den oedometriska styvheten, samtidigt som initiala icke-linjära effekter kopplade till partikelomlagring och sättningseffekter undviks. Ett exempel på metoden visas i Figur 12.



Figur 12. Spännings-töjnings svar för material M2 (bred kornstorleksfördelning) under cykel 10 i det cykliska oedometerförsöket. \* Den fullständiga hysteres slingan visas i svart, medan den identifierade lastgrenen markeras i blått. Styvheten bestäms från området nära toppspänningen (60–95 % av maximal spänning), där en linjär regression (röd) används för att beräkna en representativ oedometrisk styvhet (207 MPa).

### 3.5 Standardiserade ballasttester

Utöver de experimentella metoder som beskrivits ovan har materialen karakteriserats med standardiserade provningsmetoder för järnvägs makadam enligt relevanta europeiska standarder. Dessa omfattar kornstorleksfördelning (SS-EN 933-1), nötningsmotstånd (Micro-Deval, SS-EN 1097-1/A1), motstånd mot fragmentering (Los Angeles, SS-EN 1097-2/A1), partikelform (flisighetsindex, SS-EN 933-4) samt kontroll av överkorn enligt SS-EN 13450.

Resultaten från dessa standardprovningar sammanfattas i Tabell 4. Materialen uppvisar överlag likvärdig mekanisk kvalitet avseende nötning och fragmentering, medan skillnader främst återfinns i kornstorleksfördelning och formegenskaper, vilket speglar de avsiktliga variationerna mellan M1, M2 och M3.

Tabell 4. Sammanställning av materialegenskaper och resultat från standardprovningar för ballastmaterialen M1, M2 och M3, inklusive kornstorleksfördelning, nötningsmotstånd (Micro-Deval, MDE),

fragmenteringsmotstånd (Los Angeles, LA), andel överkorn samt flisighetsindex (SI) enligt relevanta SS-EN-standarder.

Test typ	Enhet	M1	M2	M3
SS-EN 933-1 Kornstorleksfördelning				
SS-EN 1097-1/A1 Micro Deval (MDE) RB		5	6	5
Analysprov A	%	5.2	5.7	4.9
Analysprov B				5.2
SS-EN 1097-2/A1 Los Angeles (LA) RB		15	16	15
SS-EN 13450 Andel korn > 100 mm (EA)				
Värde	%	16	4	8
Fraktion	mm	31.5-80	31.5-80	31.5-80
SS-EN 933-4 LT-index (SI)	-	16	-	18

## 4 Numerisk Modellering (DEM)

### 4.1 Modelleringsstrategi

Diskreta elementmetoden (DEM) användes som komplement till det experimentella programmet för att ge insikt i de partikelbaserade mekanismer som styr det makroskopiska beteendet som observerats i försöken. Simuleringarna användes särskilt för att analysera kraftöverföring, partikelomlagring samt hur kornstorleksfördelning påverkar materialets bulkbeteende i både oedometer- och sleeper push-konfigurationer. Samtliga simuleringar utfördes med programvaran Demify.

Oedometersimuleringarna genomfördes på NVIDIA RTX 5080-GPU:er, medan de mer beräkningskrävande sleeper push-simuleringarna utfördes på NVIDIA H200-hårdvara.

### 4.2 Partikelrepresentation

Partiklarna representerades med den dilaterade polyedermodell som finns tillgänglig i Demify. Denna representation möjliggör en mer realistisk beskrivning av inlåsning och kontaktbeteende jämfört med sfäriska partiklar, samtidigt som beräkningseffektiviteten bibehålls i förhållande till fullt upplösta polyedriska geometrier.

För att representera ballastmaterialet användes tio olika partikelgeometrier baserade på förenklade skanningar bestående av 20 respektive 24 trianglar.

Kornstorleksfördelningarna skalades för att motsvara de reducerade laboratoriegeometrierna, i enlighet med tidigare beskriven metodik. Partiklar utanför det aktuella storleksintervallet exkluderades, och de resulterande fördelningarna interpolerades i logaritmisk storleksskala för att säkerställa en jämn och konsistent representation.

Samtliga simuleringar använde kontaktmodellen Hertz–Mindlin–Deresiewicz (HMD) för att beskriva normala och tangentiella interaktioner mellan partiklar. Modellen beaktar icke-linjärt elastiskt kontaktbeteende samt historieberoende tangentiella krafter, vilket ger en realistisk beskrivning av kontaktmekniken i granulära material.

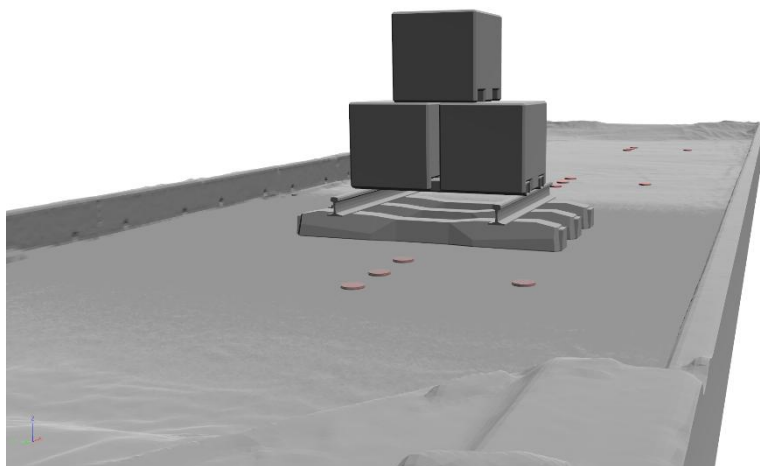
## 4.3 Sleeper push-modell

### 4.3.1 Geometri och randvillkor

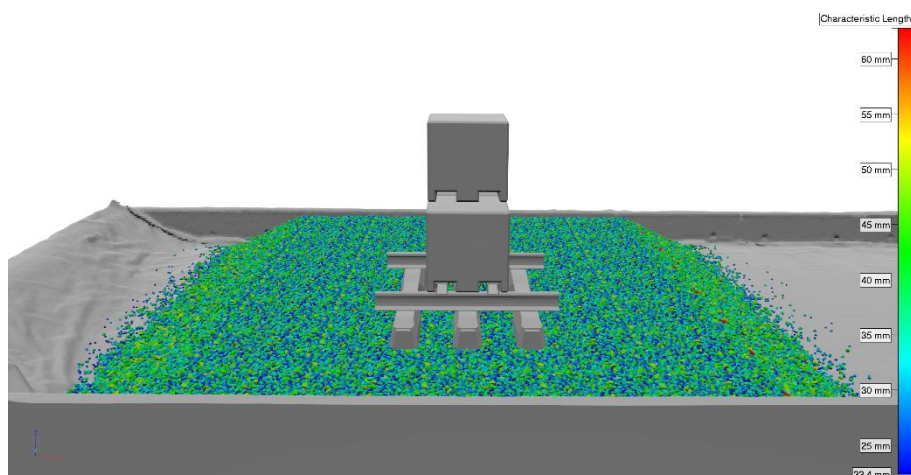
En meshgeometri för underbyggnaden genererades baserat på 3D-skanningar utförda före försöken. Positionerna för samtliga Geokon-sensorer extraherades från samma punktmoln. En CAD-modell av sleeper push-uppställningen skapades, inklusive tre betongblock, vilka används i de efterföljande DEM-simuleringarna.

För att begränsa antalet partiklar i simuleringen, och därmed reducera beräkningskostnaden, definierades ett mindre beräkningsdomän där partikelbädden är placerad. Denna domän avgränsas av väggar som håller materialet på plats. En översikt av den numeriska uppställningen visas i Figur 13 - Figur 15.

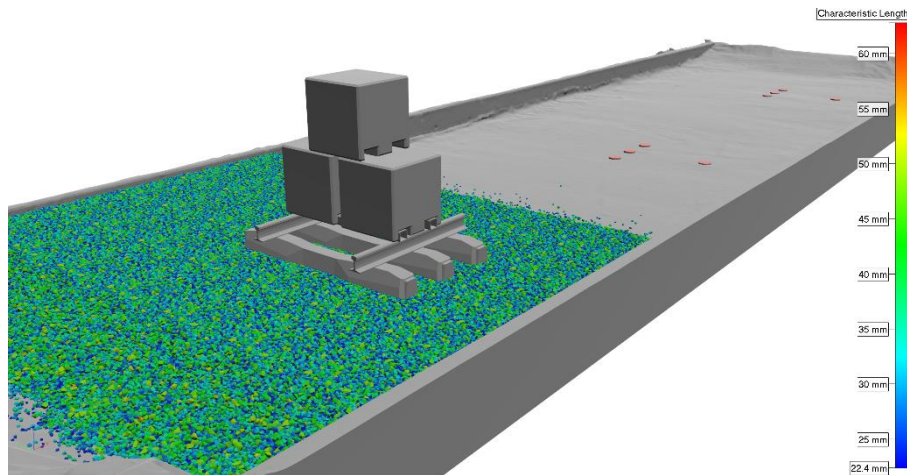
Samtliga stela komponenter (markmesh, sleeper push-uppställning och Geokon-sensorer) tilldelades samma materialegenskaper motsvarande betong. Detta val minskar antalet kalibreringsparametrar i modellen.



Figur 13. Bild från DEM-modellens uppställning av sleeper push-riggen i lastfall R4.



Figur 14. Bild från DEM-modellens initialtillstånd, frontvy.



Figur 15. Bild från DEM-modellens initialtillstånd, iso-vy.

### 4.3.2 Implementering av pålagd last

Sleeper push-riggen modelleras som ett stelt objekt i DEM-modellen, där hastigheten sätts och uppdateras med ett valt kommunikationssteg. För samtliga simuleringar i denna studie har detta tidssteg satts till  $1 \times 10^{-3}$  s.

Translation i X-led samt rotation kring Y- och Z-axlarna är fixerade. De återstående frihetsgraderna styrs genom att hastigheter uppdateras i varje kommunikationssteg. Translation i Y-led ges en konstant hastighet, vilket representerar rörelsen från den hydrauliska cylindern. Translation i Z-led samt rotation kring X-axeln bestäms genom numerisk integration av rörelseekvationerna.

För rörelsen i Z-led integreras följande samband med framåt Euler-metoden för att erhålla hastigheten:

$$F_g + F_{DEM} = ma_z$$

Här är  $F_g$  riggens tyngdkraft,  $F_{DEM}$  reaktionskraften i Z-led från partiklarna (beräknad i DEM-modellen),  $m$  riggens massa och  $a_z$  accelerationen i Z-led.

För rotation kring X-axeln används motsvarande momentjämvikt, som integreras med framåt Euler-metoden för att bestämma vinkelhastigheten:

$$M_{DEM} = I_{rig}\alpha_x$$

Här är  $M_{DEM}$  momentet kring X-axeln från partiklarna,  $I_{rig}$  tröghetsmomentet (bestämt från CAD-modellen) och  $\alpha_x$  vinkelaccelerationen kring X-axeln.

Den konstanta translationshastigheten i Y-led uppskattades från experimentella data till 4.23 m/s.

### 4.3.3 Beräknade storheter

Den asymptotiska kraften bestäms från kraft-förskjutningssambandet och definieras som medelvärdet av kraften i intervallet 30–40 mm förskjutning. Förändringen i riggens position i Z-led mellan början och slutet av simuleringen analyseras också som ett mått på sättning.

## 4.4 Oedometermodell

### 4.4.1 Geometri och randvillkor

Modelluppställningen för oedometersimuleringen visas i Figur 16 och består av en cylindrisk behållare, en bottenplugg och en kolv. Dessa komponenter baseras på en CAD-modell med samma dimensioner som den fysiska provutrustningen, vilka sammanfattas i Tabell 5.

Samtliga komponenter är tillverkade av stål, och hela oedometeruppställningen modelleras som ett stelt system i DEM-modellen. Cylindern och bottenpluggen är fixerade, medan kolven rör sig vertikalt för att applicera ett känt tryck på partikelbädden. Denna rörelse styrs enligt den metodik som beskrivs närmare i avsnitt 4.3.2.



Figur 16. Oedometeruppställningen består av en cylindrisk behållare (lila), en bottenplugg (gul) och en kolv (blå). Cylindern är fylld med en partikelbädd (grå).

Ballastpartiklarna modelleras med den partikelrepresentation som beskrivs i avsnitt 4.2. Oedometern fylls med totalt 2750 g material, vilket ger en bäddhöjd på cirka 80–85 mm. Samma skalade kornstorleksfördelning som i experimenten används i simuleringarna, se Figur 4.

Partiklar mindre än 5.6 mm exkluderas i simuleringarna för att möjliggöra större tidssteg i DEM-beräkningarna, där tidssteget sätts till  $5 \times 10^{-7}$  s. Detta är särskilt relevant eftersom finare partiklar kräver mindre tidssteg och därmed kraftigt ökar beräkningstiden. Av denna anledning inkluderas inte M3.2 i simuleringarna, eftersom en större andel av detta material utgörs av finfraktioner. För M1 och M2 utgör partiklar under 5.6 mm endast cirka 1 % av kornstorleksfördelningen.

Det bör även noteras att en fullständig simulering av M3.2 låg utanför projektets tidsramar, då den ökade beräkningskostnaden i kombination med projektets slutskede begränsade möjligheten att genomföra ytterligare simuleringar. Det är dock absolut principiellt möjligt i ett eventuellt fortsättningsprojekt.

Oedometeruppställningen modelleras i stål, medan ballastpartiklarna antas bestå av granit. Materialparametrar samt kontaktinteraktioner definieras i Tabell 5. Kontaktkrafterna beräknas med Hertz–Mindlin–Deresiewicz (HMD)-modellen.

Tabell 5. Material- och interaktionsparametrar

Parameter	Symbol	Värde	Enhet
Granit densitet	$\rho_g$	2700	kg/m <sup>3</sup>
Granit Young's modulus	$E_g$	40	GPa
Granit Poisson's ratio	$\nu_g$	0.2965	-
Stål densitet	$\rho_s$	7800	kg/m <sup>3</sup>
Stål Young's modulus	$E_s$	20	GPa
Stål Poisson's ratio	$\nu_s$	0.3	-
Granit-granit friktion	$\mu_{gg}$	0.700	-
Granit-granit restitution	$e_{gg}$	0.633	
Stål-granit friction	$\mu_{sg}$	0.400	-
Stål-granit restitution	$e_{sg}$	0.424	-

#### 4.4.2 Loading Implementation

För att applicera ett föreskrivet tryck från kolven på partikelbädden används en proportionell–integrerande (PI) regulator med en cyklisk trapezformad trycksignal som referens. Referenstrycket följer samma belastningshastighet och maximala tryck som i de experimentella försöken.

Även om trycket är den styrda storheten regleras systemet genom att justera kolvens hastighet  $v(t)$  vid tiden  $t$  under DEM-simuleringen, med uppdateringar varje  $1 \times 10^{-3}$  s.

Innan kolven kommer i kontakt med partikelbädden ( $p_{\text{sim}}(t) \leq p_{\text{contact}}$ ) initieras simuleringen med en linjärt varierande hastighet. Efter denna initiala fas regleras lasten med hjälp av PI-regulatorn. Kolvhastigheten definieras därmed som:

$$v(t) = \begin{cases} v_{\text{init}} - 1.1t, & p_{\text{sim}}(t) \leq p_{\text{contact}} \\ \min(K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, v_{\text{max}}), & p_{\text{sim}}(t) > p_{\text{contact}} \end{cases}$$

där

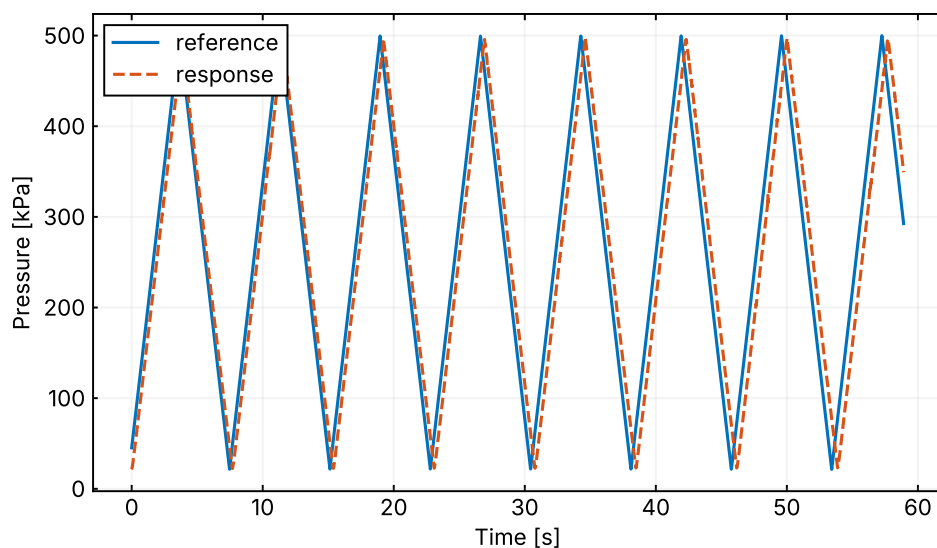
$$e(t) = p_{\text{sim}}(t) - p_{\text{ref}}(t)$$

Reglerfelet definieras som skillnaden mellan det simulerade vertikala trycket  $p_{\text{sim}}$  och referenstrycket  $p_{\text{ref}}$ . Parametrarna  $K_p$  och  $K_i$  representerar regulatorns proportionella respektive integrerande förstärkning och har anpassats för den aktuella tillämpningen. Regulatorns utsignal begränsas av  $v_{\text{max}}$  för att undvika alltför stora oscillationer.

De valda parametrarna sammanfattas i Tabell 6, och regleringen av det cykliska trapezformade trycket visas i Figur 17. Figuren visar att regulatorn snabbt uppnår önskat responsförlopp.

Tabell 6. Lastuppställning använd i simuleringen

Parameter	Symbol	Värde	Enhet
Initial hastighet	$v_{\text{init}}$	0.3	m/s
Maximal reglerad hastighet	$v_{\text{max}}$	0.1	m/s
Förspänningstryck	$p_{\text{contact}}$	18	kPa
Belastningshastighet		125	kPa/s
Maximal belastning	$p_{\text{max}}$	500	kPa
Proportionell förstärkning	$K_p$	3e-8	-
Integrerande förstärkning	$K_i$	1e-10	-



Figur 17. Tryckreglering med PI-regulator. Det simulerade trycket (responsen) följer referenssignalen.

#### 4.4.3 Beräknade storheter

Från simuleringsdata extraheras trycket (och motsvarande kraft) tillsammans med deformationen hos partikelbädden, vilket möjliggör uppskattning av töjningen. Baserat på dessa storheter bestäms partikelbäddens styvhet för varje lastcykel utifrån minimi- och maximivärden i spännings-töjningssambandet, vilket gör det möjligt att analysera styvhetens utveckling över tid.

Vid efterbearbetningen exkluderas den första lastcykeln, eftersom partikelbädden initialt behöver sätta sig och jämnas ut. Detta ger upphov till stora deformationer som inte är representativa för det efterföljande materialbeteendet.

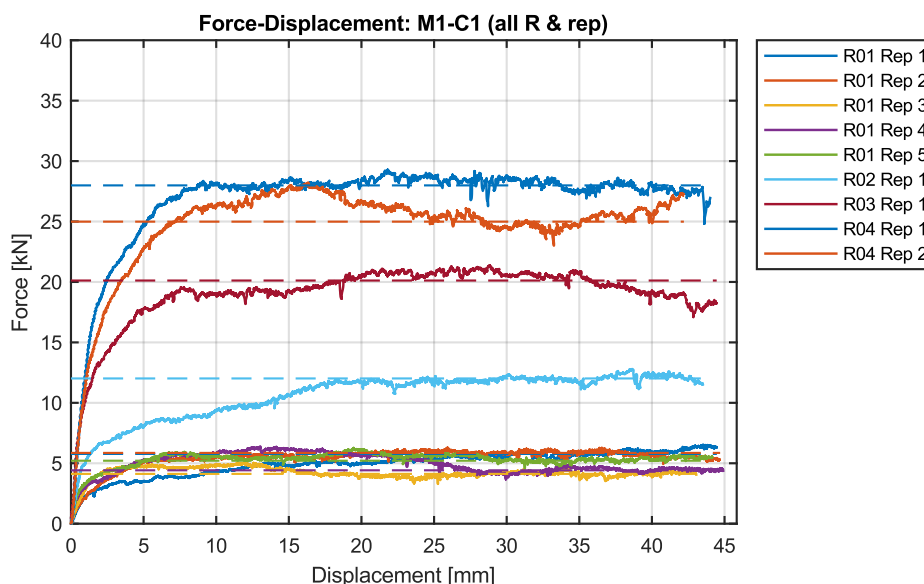
## 5 Experimentella resultat

### 5.1 Resultat från sleeper push tester

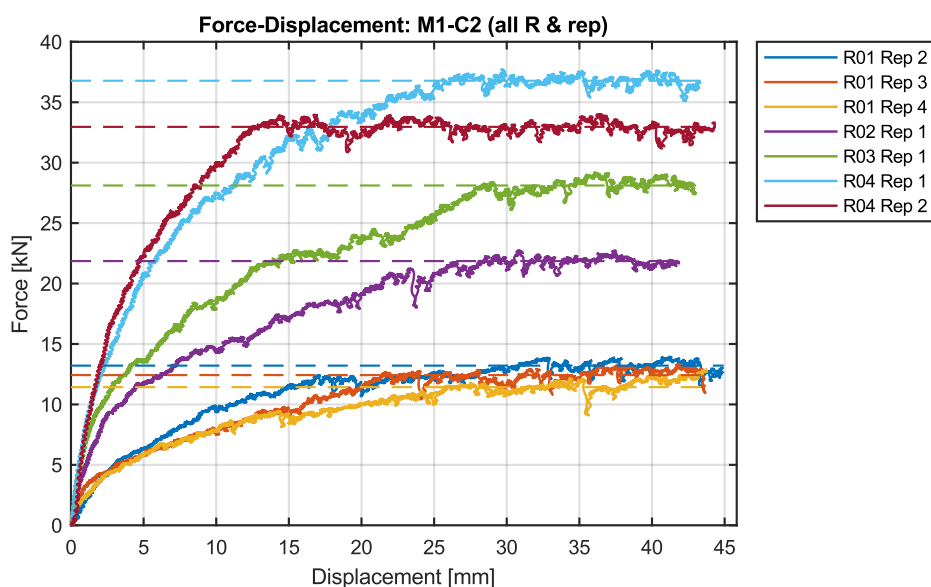
#### 5.1.1 Kraft-förskjutningsbeteende

Kraft-förskjutningssvaren för samtliga material och lastfall redovisas i Figur 18 till Figur 23. Resultaten uppvisar ett konsekvent övergripande beteende, karakteriserat av en initial snabb ökning av motståndskraften vid små förskjutningar, följt av en gradvis övergång mot en asymptotisk kraftnivå. Detta beteende speglar den successiva mobiliseringen av partikelinlåsning och uppbyggnaden av kraftkedjor i ballastlagret.

En tydlig och dominerande trend för samtliga material är den starka påverkan från vertikallast (R01–R04) och randvillkor (C1 respektive C2). Ökad vertikallast leder systematiskt till högre mobiliserat motstånd, där högre lastfall uppvisar både större initial styvhet och högre asymptotiska kraftnivåer. På motsvarande sätt ger konfigurationen med ballastskuldra som sidostöd (C2) genomgående betydligt högre motstånd jämfört med konfigurationen utan sidostöd (C1), vilket visar att lateral inspänning har stor betydelse för att stabilisera den granulära strukturen och förbättra skjuvkraftöverföringen. För material M1 (Figur 18–Figur 19) uppvisar C1-konfigurationen relativt begränsat motstånd för de lägre lastfallen (R01–R02), medan skillnaderna mellan lastfallen blir tydligare vid ökande vertikallast. Under C2 förstärks responsen markant, där högre lastfall når avsevärt större kraftnivåer och uppvisar ett mer stabilt platåbeteende. Variationen mellan upprepade försök är relativt låg vid högre laster, vilket indikerar en stabilare kraftkedjestruktur under ökad lateral inspänning.



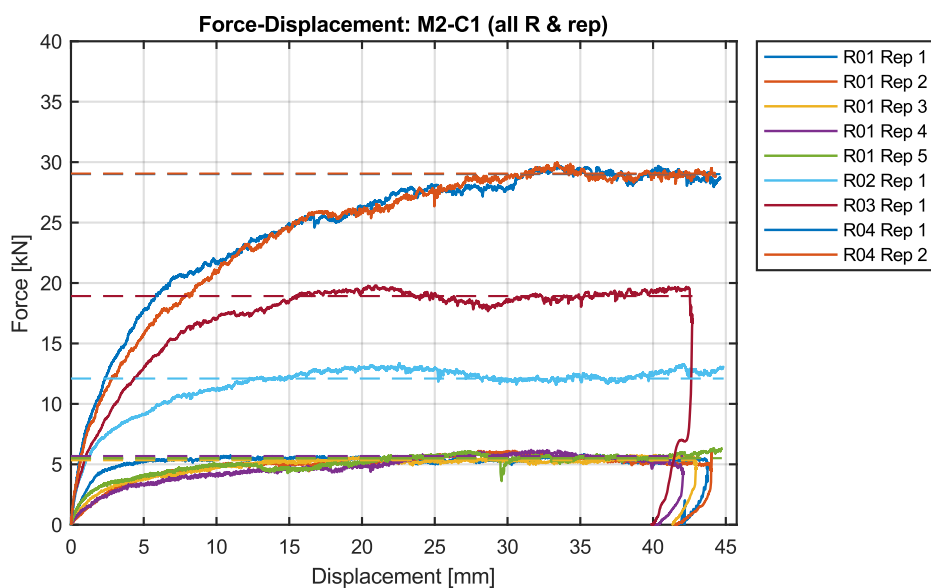
Figur 18. Kraft-förskjutningssvar för material M1 (standardfördelning) under konfiguration C1 (utan ballastskuldra) i sleeper push testet.



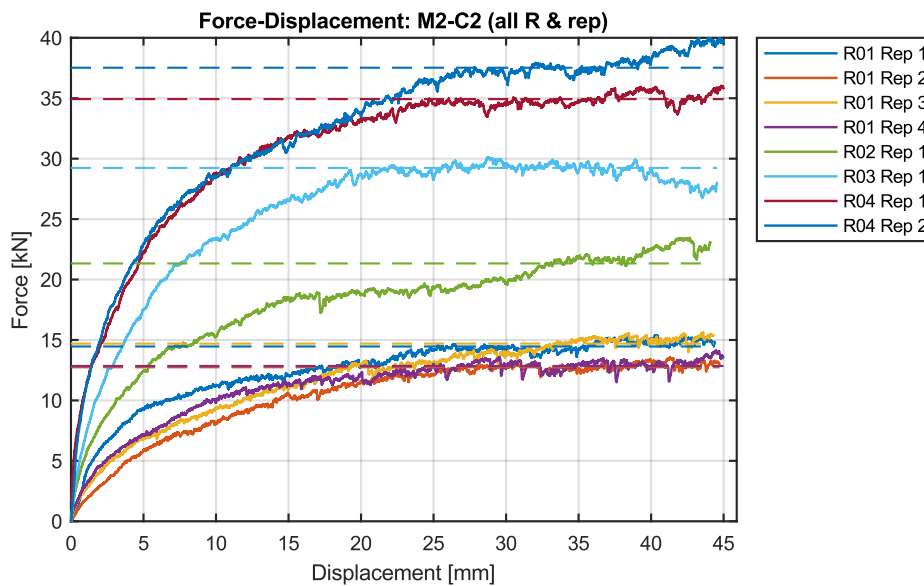
Figur 19. Kraft-förskjutningssvar för material M1 (standardfördelning) under konfiguration C2 (med ballastskuldra) i sleeper push testet.

För material M2 (Figur 20–Figur 21) observeras ett liknande övergripande beteende, men med en något mer gradvis kraftutveckling och i vissa fall ökad variation vid större förskjutningar. Under C1 uppnår de högsta lastfallen (R03–R04) kraftnivåer jämförbara med M1, men övergången till den asymptotiska regimen framstår som mindre skarp.

Under C2, med ballastskuldra och sidostöd, uppvisar M2 en tydlig ökning av motståndet, men också vissa indikationer på instabilitet eller plötsliga kraftfall i enskilda repetitioner. Detta skulle kunna indikera på lokala omarrangemang av partiklar eller brott i partikelstrukturen.



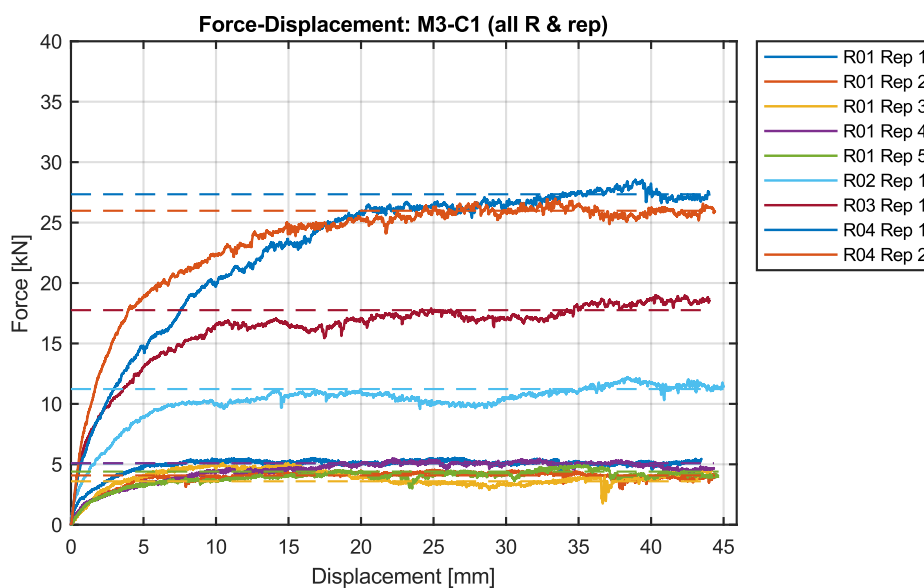
Figur 20. Kraft-förskjutningssvar för material M2 (bred fördelning) under konfiguration C1 (utan ballastskuldra) i sleeper push testet.



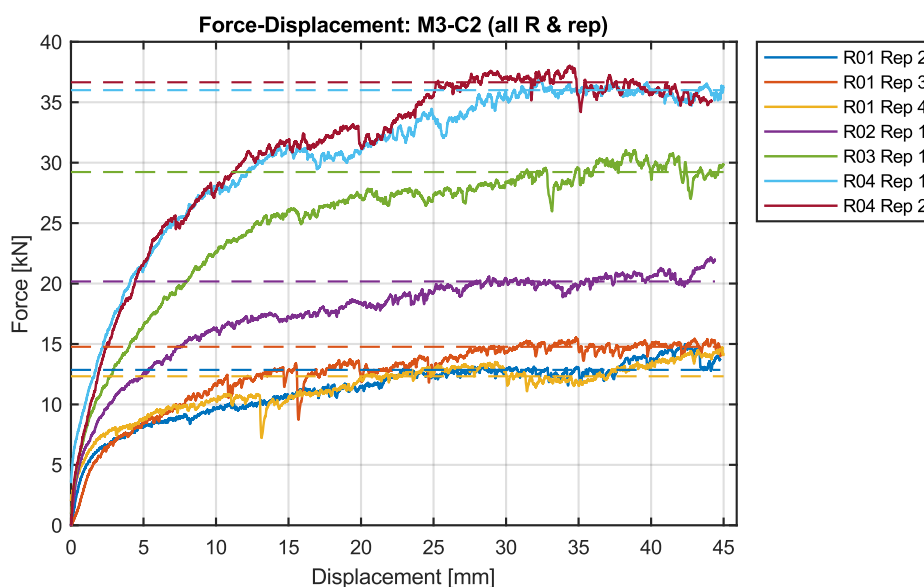
Figur 21. Kraft-förskjutningssvar för material M2 ( bred fördelning) under konfiguration C2 (med ballastskuldra) i sleeper push testet.

För material M3 (Figur 22–Figur 23) är responsen generellt jämnare, med en mer gradvis mobilisering av motståndet över samtliga lastnivåer. Under C1 är de asymptotiska kraftnivåerna för de högre lasterna jämförbara med M1 och M2, medan den initiala styvheten är något lägre.

Under C2, med ballastskuldra och sidostöd, uppvisar M3 en tydlig ökning av motståndet, i samma storleksordning som de övriga materialen, men med en mer kontinuerlig och mindre abrupt övergång mot topprespons. Detta indikerar en mer distribuerad lastöverföring i partikelstrukturen.



Figur 22. Kraft-förskjutningssvar för material M3 (bi-modal fördelning) under konfiguration C1 (utan ballastskuldra) i sleeper push testet.



Figur 23. Kraft-förskjutningssvar för material M3 (bi-modal fördelning) under konfiguration C2 (med ballastskuldra) i sleeper push testet.

De streckade horisontella linjerna i figurerna, som representerar de asymptotiska kraftnivåerna, visar att responsen trots lokala variationer konvergerar mot väldefinierade medelvärden för respektive lastfall.

Sammanfattningsvis visar kraft-förskjutningsresultaten att:

- Vertikallast och lateral inspänning är de dominerande parametrarna för sidomotståndet i sleeper push testet
- Samtliga material uppvisar liknande kvalitativt beteende, där skillnaderna främst återfinns i styvhetsutveckling och hur gradvis responsen mobiliseras
- Den asymptotiska motståndskraften är väldefinierad och ökar systematiskt med lastnivån
- Variationen mellan upprepade försök är begränsad och relativt konsistent mellan lastfallen, vilket indikerar god robusthet i den experimentella metodiken

Dessa observationer utgör grunden för den efterföljande karakteriseringen av skjuvhållfasthet baserad på Mohr-Coulomb-analys.

## 5.2 Karakterisering av skjuvhållfasthet

De härledda Mohr-Coulomb-brottninjerna, se Figur 24 och Figur 25, visar ett konsekvent och nära linjärt samband mellan skjuvspänning och normalspänning för samtliga undersökta material och randvillkor. Friktionsvinkeln ( $\varphi$ ) varierar inom ett relativt smalt intervall (cirka  $30,5^\circ$ – $32,5^\circ$ ), vilket indikerar att den friktionsbaserade delen av skjuvhållfastheten i stor utsträckning är okänslig för variationer i kornstorleksfördelning.

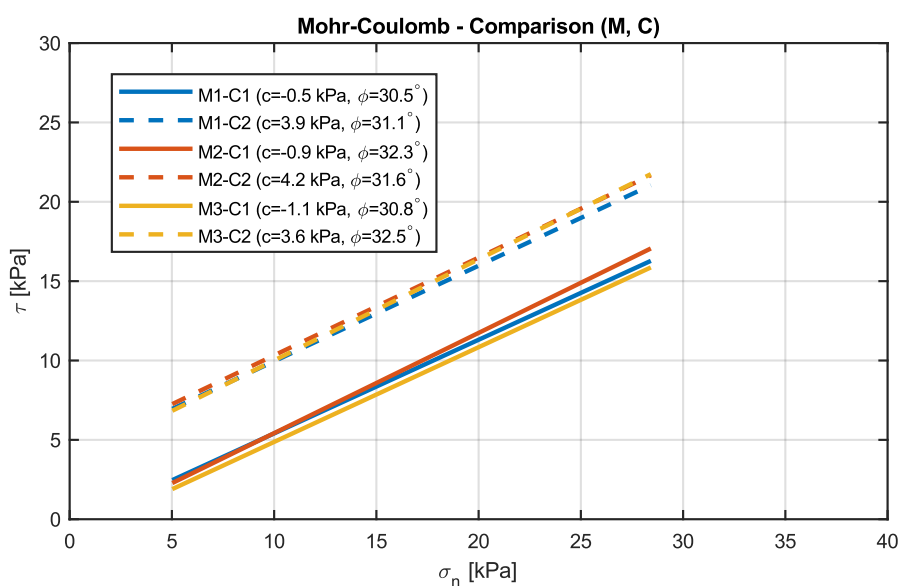
Den skenbara kohesionen ( $c$ ) uppvisar däremot ett tydligt beroende av randvillkoren. För samtliga material ger C2-konfigurationen, med ballastskuldra och sidostöd, en markant ökning av kohesionen jämfört med C1. Detta speglar betydelsen av lateral inspänning och partikelinlåsning för materialets skjuvmotstånd. Resultaten indikerar

därmed att randvillkor och packningstillstånd har större påverkan på skjuvhållfastheten än själva graderingen.

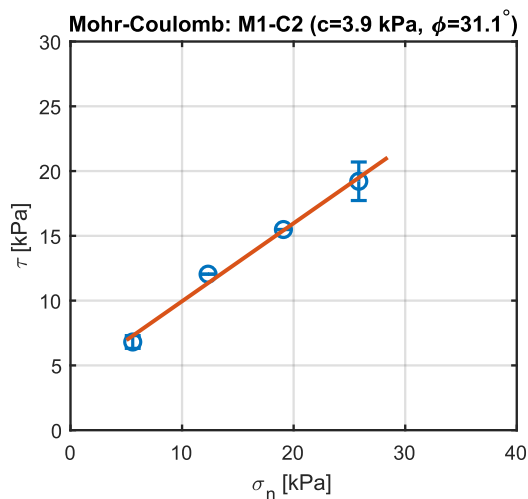
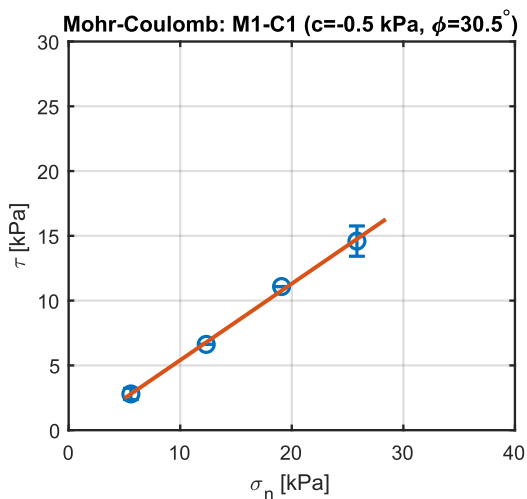
Vid jämförelse mellan materialen observeras endast mindre skillnader. M2 uppvisar en något högre friktionsvinkel, medan M1 och M3 visar likartat beteende.

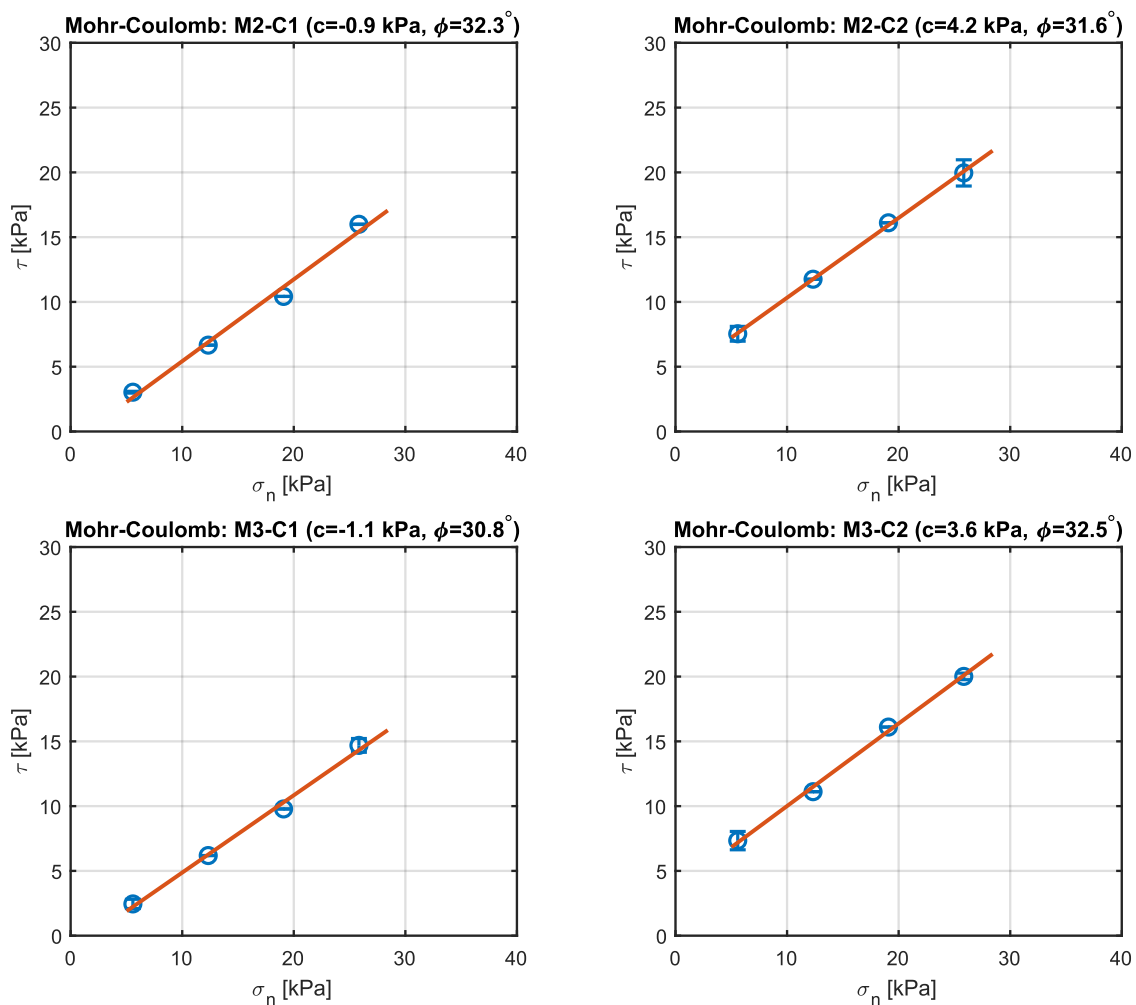
Kohesionsvärdena under C2 är dessutom relativt lika för samtliga material, vilket indikerar att effekten av ökad inspänning dominerar över skillnader i kornstorleksfördelning.

Sammantaget tyder resultaten på att även om kornstorleksfördelningen påverkar andra aspekter av ballastens beteende, är dess direkta påverkan på Mohr–Coulomb-parametrarna sekundär jämfört med effekten av inspänning och randvillkor.



Figur 24. Mohr–Coulomb-brottningslinjor för materialen M1 (standardfördelning), M2 (bred fördelning) och M3 (bimodal fördelning) under randvillkoren C1 (utan sidostöd) och C2 (med ballastskuldra och sidostöd), baserade på resultaten från sleeper push testerna. Anpassad kohesion ( $c$ ) och friktionsvinkel ( $\phi$ ) anges i figurförklaringen för respektive fall. Resultaten visar en tydlig ökning av den skenbara kohesionen under den mer inspända configurationen (C2), medan friktionsvinkeln förblir relativt likartad mellan materialen och provningsförhållandena.



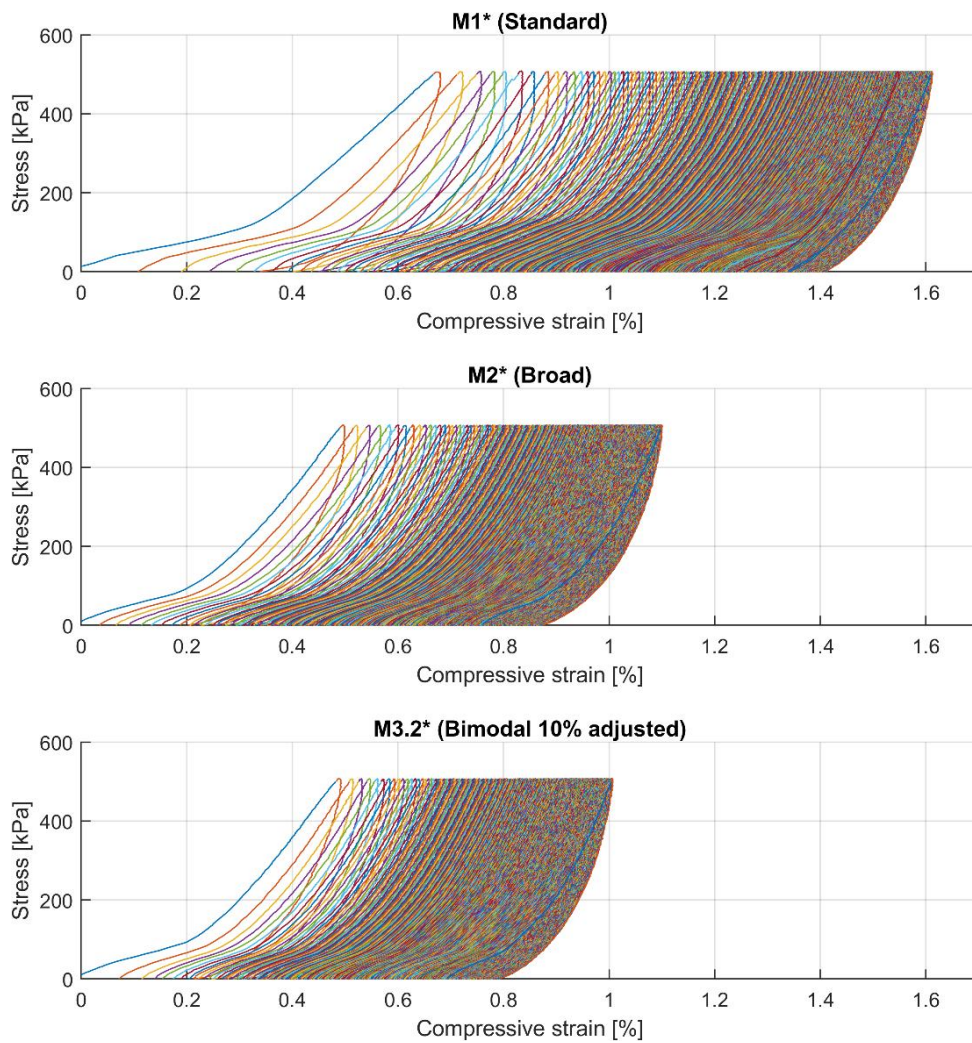


Figur 25. Individuella Mohr-Coulomb-diagram för respektive material och randvillkor.

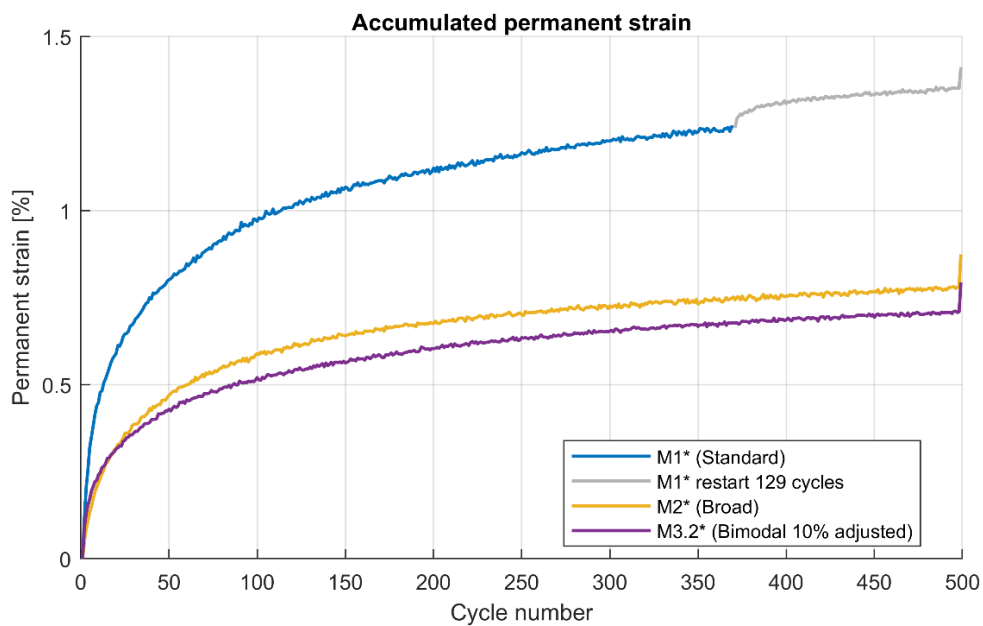
### 5.3 Resultat från oedometer-experiment

Utvecklingen av det mekaniska beteendet under cyklisk oedometrisk belastning för de tre materialen illustreras samlat i Figur 26–Figur 28. Spännings-töjningskurvorna uppvisar en successiv förskjutning åt höger med ökande antal lastcykler, vilket indikerar kontinuerlig ackumulering av permanent töjning. Samtidigt visar den ökande lutningen hos lastgrenarna en gradvis uppstyvning av den granulära strukturen.

Detta beteende kvantifieras i Figur 27, där den ackumulerade permanenta töjningen ökar snabbt under de inledande lastcyklerna, följt av en avtagande ackumulationstakt när materialet närmar sig ett mer stabilt packningstillstånd. Av materialen uppvisar M1 den största permanenta töjningen, vilket tyder på mer omfattande partikelomlagring och ett lösare initialt packningstillstånd. M2 och M3.2 uppvisar däremot mer begränsade deformationer.



Figur 26. Cykliskt oedometriskt spännings-töjnings svar för de skalade materialen M1\*, M2\* och M3.2\*.

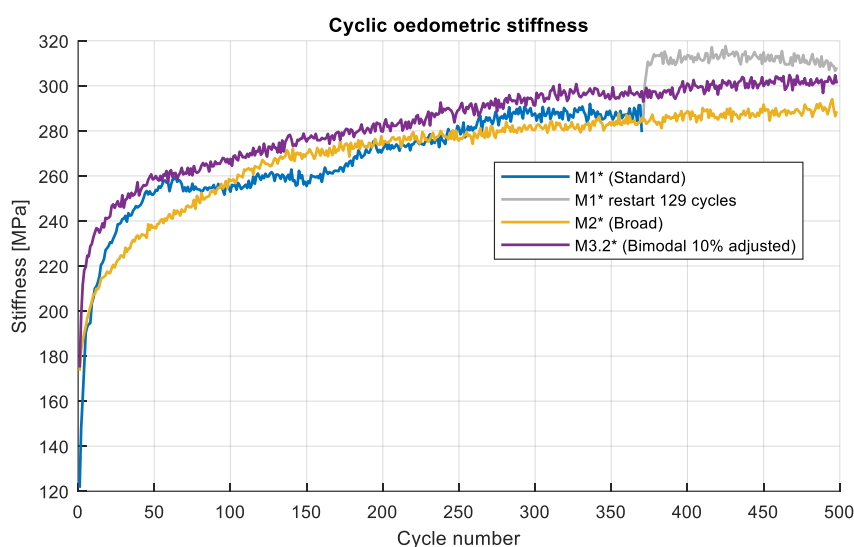


Figur 27. Ackumulerad permanent töjning som funktion av antal lastcykler för materialen M1, M2 och M3.2 under cyklisk oedometrisk belastning.

Den motsvarande utvecklingen av styvheten visas i Figur 28, där samtliga material uppvisar en tydlig ökning av den cykliska oedometriska styvheten med ökande antal lastcykler. Styvheten närmar sig ett kvasi-stabiliserat tillstånd efter cirka 200–300 cykler. Denna uppstyvning är konsistent med den densifiering som observeras i Figur 26 och Figur 27, där ökad kontakttäthet och en mer utvecklad kraftkedjestruktur förbättrar materialets lastbärande förmåga.

M3.2 uppvisar särskilt en relativt hög initial styvhet och en jämn utveckling över belastningscyklerna, medan M2 generellt uppvisar en lägre styvhetsnivå. Den observerade ökningen i styvhet för M1 vid senare cykler bör dock tolkas med viss försiktighet, eftersom den sammanfaller med övergången mellan olika datafiler eftersom testat behövde startas om för de sista 129 cyklerna.

Sammantaget visar resultaten att kornstorleksfördelningen har tydlig påverkan på både deformationsackumulering och styvhetsutveckling under cyklisk belastning.



Figur 28. Cyklisk oedometrisk styvhet som funktion av antal lastcykler för materialen M1, M2 och M3.2, vilket visar en successiv uppstyvning och gradvis övergång mot ett stabiliserat responsförlopp med ökande antal belastningscykler.

### 5.3.1 Kornstorleksfördelning och nedbrytningsindex

Kornstorleksfördelningen (PSD) för ballastmaterialen beskrivs med både den kumulativa passerande fördelningen  $Q_3(d)$  och frekvensfördelningen  $q_3$ , där  $q_3$  representerar massandelen inom respektive storleksintervall och  $Q_3$  den kumulativa passerande andelen för en given partikelstorlek  $d$ .

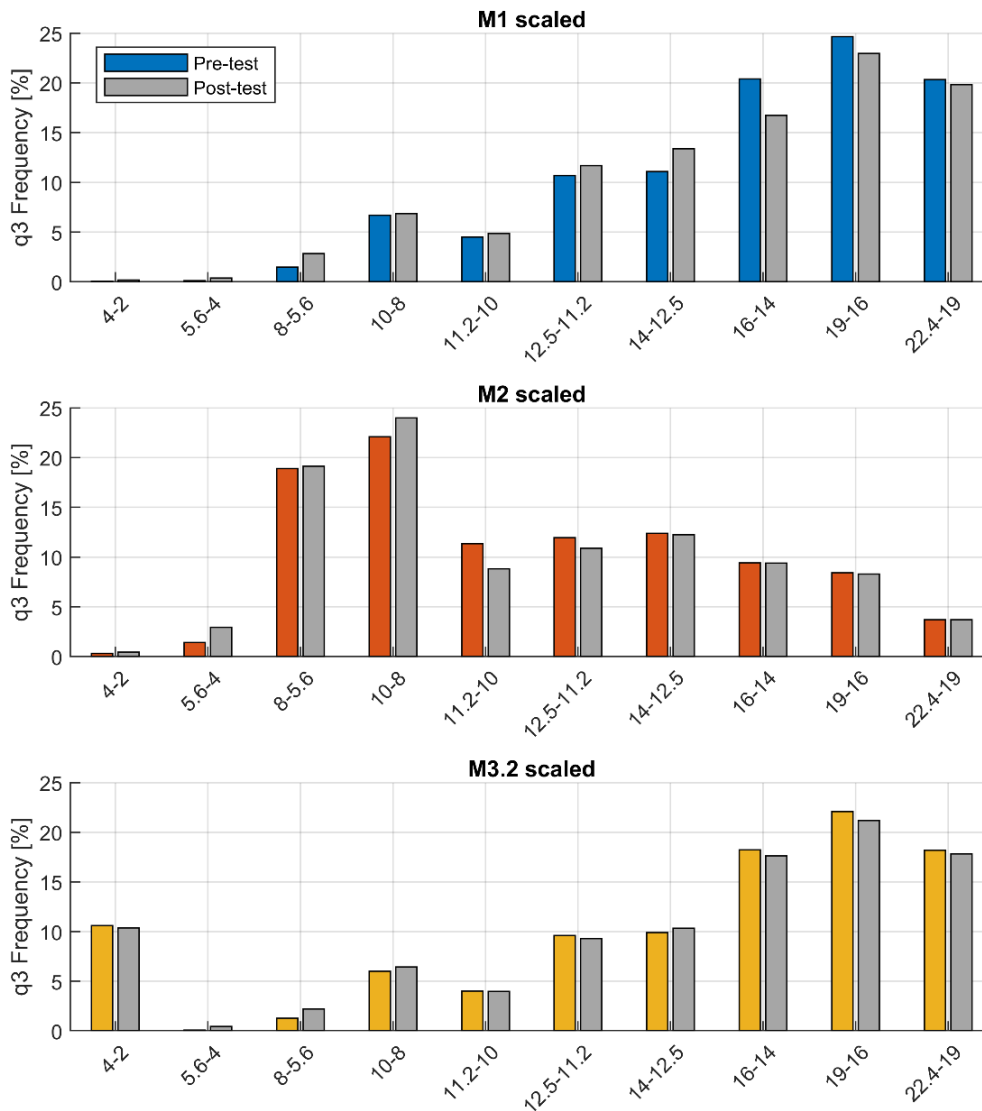
Utvecklingen av kornstorleksfördelningarna till följd av cyklisk belastning illustreras i Figur 29–Figur 32. De kumulativa fördelningarna (Figur 29) visar en systematisk förskjutning uppåt för samtliga material inom det intermediära storleksintervallet, vilket indikerar en generell omfördelning av material mot mindre partikelstorlekar. Effekten är mest uttalad för M2, som uppvisar en tydligare initial gradering och därmed också större förändringar efter provning.



Figur 29. Kumulativa kornstorleksfördelningar (Q3) för materialen M1, M2 och M3.2 före och efter cyklisk oedometrisk belastning.

Frekvensfördelningarna (Figur 30) ger en mer detaljerad bild av denna omfördelning. För samtliga material observeras en minskning av de grövre fraktionerna, samtidigt som andelen mellanfraktioner och finmaterial ökar. Trenden är särskilt tydlig för M1, där betydande reduktioner sker i de största storleksklasserna, vilket indikerar omfattande partikelkrossning av grova partiklar.

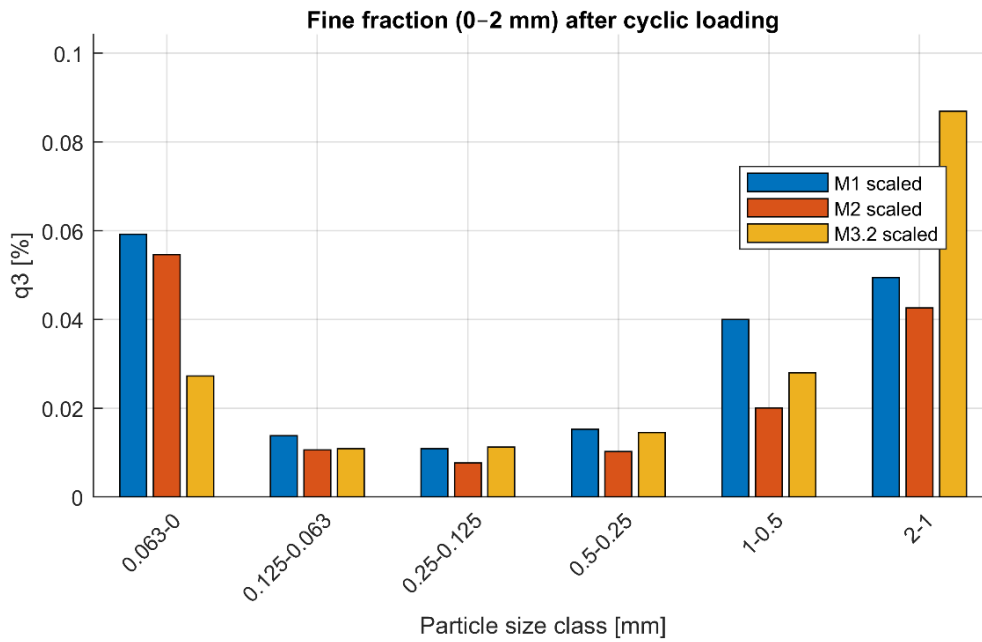
Genereringen av finmaterial (Figur 31) tydliggör ytterligare skillnader mellan materialen. M3.2 uppvisar den största ackumuleringen av material i intervallet 1–2 mm, vilket tyder på att den bimodala fördelningen främjar fragmentering mot denna storleksklass. M1 och M2 uppvisar däremot en mer distribuerad produktion av finmaterial över hela området under 2 mm, med relativt större andelar i de allra finaste fraktionerna.



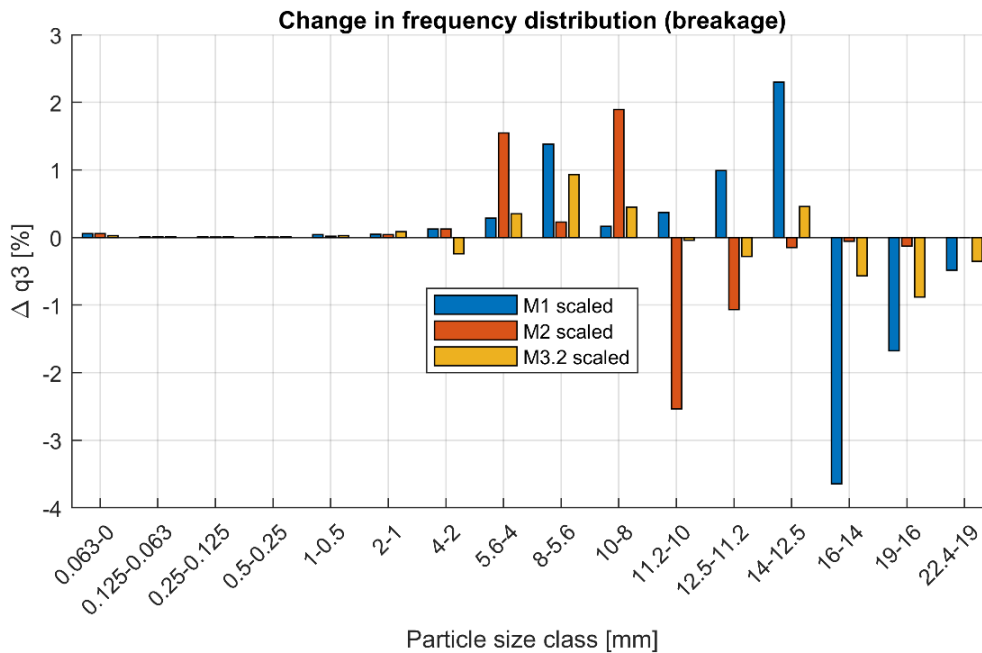
Figur 30. Frekvensfördelningar ( $q_3$ ) för materialen M1, M2 och M3.2, som visar massandelar inom respektive storleksintervall före och efter cyklisk belastning.

Omfördelningen av material sammanfattas i Figur 32 genom förändringen i frekvensfördelning,  $\Delta q_3$ . Positiva värden i de mindre storleksklasserna och motsvarande negativa värden i de grövre fraktionerna bekräftar att partikelkrossning är den dominerande mekanismen. Storleken och fördelningen av dessa förändringar skiljer sig mellan materialen. M1 uppvisar den mest uttalade reduktionen av grova partiklar, medan M2 och M3.2 visar en mer lokaliserad omfördelning mot mellanfraktioner.

Resultaten visar att den initiala kornstorleksfördelningen har stor påverkan på både omfattningen och typen av nedbrytning. Detta påverkar inte enbart den totala genereringen av finmaterial, utan även vilka specifika storleksintervall som materialet omfördelas till.



Figur 31. Frekvensfördelning för finmaterial (0–2 mm) efter cyklisk belastning för materialen M1, M2 och M3.2.



Figur 32. Förändring i frekvensfördelning ( $\Delta q_3$ ) för materialen M1, M2 och M3.2, som visar omfördelning av material mellan storleksklasser till följd av partikelkrossning.

### 5.3.2 Absolut kumulativ förändring i kornstorleksfördelning

Den övergripande förändringen i kornstorleksfördelningen utvärderades först med hjälp av den absoluta skillnaden mellan de kumulativa fördelningarna,

$$B_Q = \sum_i |Q_{3,\text{post},i} - Q_{3,\text{pre},i}|$$

där  $Q_{3,pre,i}$  och  $Q_{3,post,i}$  representerar den kumulativa passerande andelen före respektive efter provning. Detta index ger ett globalt mått på omfördelningen av material över hela storleksintervallet, oberoende av förändringens riktning.

### 5.3.3 Marsal nedbrytningsindex

Marsals nedbrytningsindex (Marsal Raúl J., 1967) kvantifierar genereringen av material i de storleksklasser som ökar under provningen och definieras som

$$B_M = \sum_i \max (q_{3,post,i} - q_{3,pre,i}, 0)$$

Denna formulering beaktar endast positiva ökningarna i frekvensfördelningen och fångar därmed bildandet av nya fragment till följd av partikelkrossning. Indexet uttrycks vanligtvis i procent.

### 5.3.4 Generering av finmaterial

För att specifikt utvärdera produktionen av finmaterial analyserades den kumulativa andelen partiklar mindre än 2 mm före och efter provning,

$$F_{<2\text{ mm}} = \sum_{d_i < 2\text{ mm}} q_{3,i}$$

Den totala genereringen av finmaterial definieras därefter som

$$\Delta F_{<2\text{ mm}} = F_{post,<2\text{ mm}} - F_{pre,<2\text{ mm}}$$

Utöver den inkrementella genereringen av finmaterial redovisas även den totala finmaterialhalten efter provning,  $F_{post,<2\text{ mm}}$ , som ett mått på materialets slutliga nedbrytningstillstånd.

### 5.3.5 Tolkning av nedbrytningsindex

De valda indexen ger kompletterande perspektiv på ballastens nedbrytning:

- $B_Q$  beskriver den övergripande omfördelningen av material över hela kornstorleksfördelningen  
 $B_M$  beskriver genereringen av nya fragment till följd av partikelkrossning  
 $F_{<2\text{ mm}}$  isolerar bildningen av finmaterial, vilket är särskilt relevant för ballastens funktion och risken för fouling

Tillsammans möjliggör dessa mått en konsistent och fysikaliskt tolkbar utvärdering av nedbrytningsbeteendet för olika kornstorleksfördelningar.

Som framgår av Tabell 7 uppvisar material M1 de högsta värdena för både det kumulativa omfördelningsindexet  $B_Q$  och Marsals nedbrytningsindex  $B_M$ . Detta indikerar en mer omfattande omfördelning av kornstorleksfördelningen och en högre grad av fragmentgenerering jämfört med de övriga materialen. M2 och M3.2 uppvisar däremot lägre värden på både  $B_Q$  och  $B_M$ , vilket tyder på mindre omfattande partikelkrossning och omfördelning.

Finmaterialhalten  $F_{<2\text{ mm}}$  följer dock inte samma trend, där M3.2 uppvisar en relativt hög halt finmaterial jämfört med M2. Detta indikerar att även om den totala nedbrytningen i M3.2 är lägre, leder en större andel av fragmenteringen till bildning av fina partiklar. Detta beteende är konsistent med den bimodala karaktären hos M3.2, där förekomsten av mindre partiklar kan främja lokal krossning och generering av finmaterial snarare än en bred omfördelning över flera storleksklasser.

Tabell 7. Sammanställning av nedbrytningsindex för materialen M1, M2 och M3.2 efter cyklisk oedometrisk belastning, inklusive kumulativ förändring i kornstorleksfördelning  $B_Q$ , Marsals nedbrytningsindex  $B_M$  (uttryckt i procent) samt slutlig finmaterialhalt under 2 mm,  $F_{<2\text{ mm}}$ .

Material	$B_Q$	$B_M$	$F_{<2\text{ mm}}$
M1	0.2017	5.807	0.1886
M2	0.1064	3.938	0.1456
M3.2	0.1004	2.365	0.1789

Resultaten visar att kornstorleksfördelningen har en tydlig påverkan på fragmenteringsbeteendet, både avseende omfattningen av nedbrytningen och hur materialet omfördelas. Skillnader observeras särskilt mellan mer utbredd fragmentering över flera storleksklasser och mer lokaliserad generering av finmaterial.

## 6 Simuleringsresultat

### 6.1 Sleeper Push Simulering

För att kalibrera sleeper push-simuleringen genomfördes en fullfaktoriell försöksplanering (DOE, Design of Experiments) för de parametrar som bedömdes ha störst påverkan på resultaten. I denna studie valdes följande variabler:

- friktion mellan partiklar och sliper
- restitution mellan partiklar och sliper
- partikel-partikel-friktion under initialisering av partikelbädden

Friktion och restitution mellan partiklar och sliper utgör de huvudsakliga parametrarna som styr interaktionen mellan slipern och ballastbädden. Partikel-partikel-friktionen under initialiseringen är däremot direkt kopplad till packningsgraden i ballastlagret. Denna friktion används endast under initialiseringen för att uppnå önskad packningstäthet och används inte under den efterföljande sleeper push-simuleringen.

För respektive parameter valdes ett lågt, mellanliggande och högt värde, vilka redovisas i Tabell 8.

Tabell 8. Övre och undre variationsgränser för DOE-parametrarna

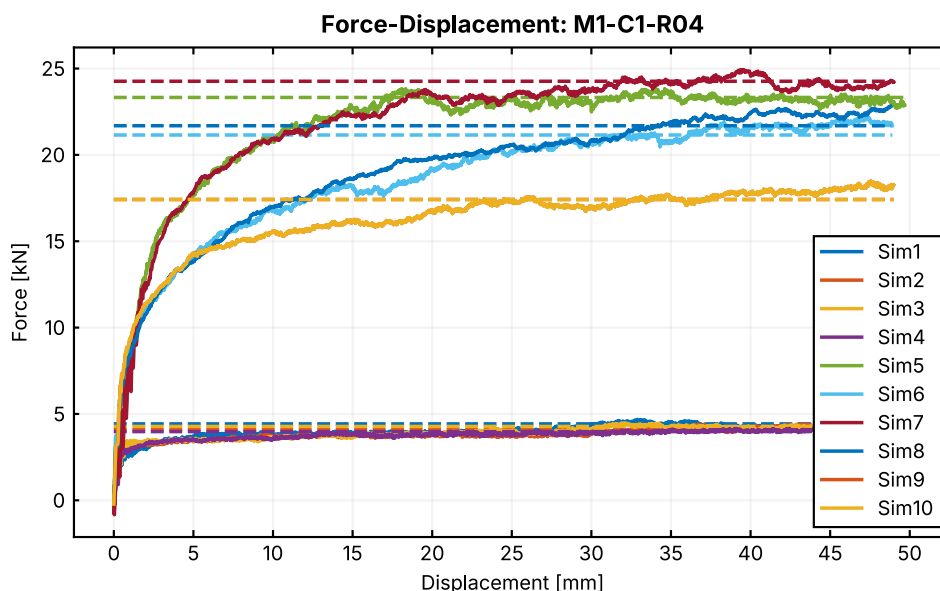
Variabel	Låg	Mellan	Hög
Partikel-slipers friktion	0.1	0.5	0.9
Partikel-slipers restitution	0.1	0.5	0.9
Partikel-partikel friktion	0.01	0.255	0.5

En fullfaktoriell DOE med tre variabler ger totalt åtta simuleringar. Utöver dessa genomfördes även två simuleringar med samtliga parametrar satta till mellanvärden, vilket ger totalt tio simuleringar. Samtliga simuleringsfall och använda parametrar redovisas i Tabell 9.

Tabell 9. Sammanställning av samtliga simuleringsfall och parameterkombinationer som ingår i DOE-studien.

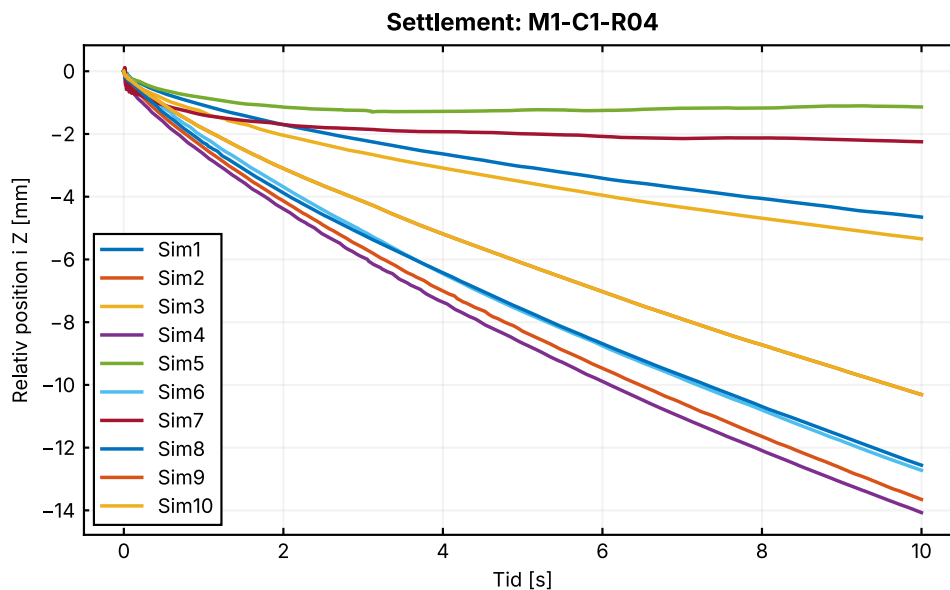
Simuleringsnamn	Partikel-sliper friktion	Partikel-sliper restitution	Partikel-Partikel friktion
Sim1	0.1	0.1	0.01
Sim2	0.1	0.1	0.5
Sim3	0.1	0.9	0.01
Sim4	0.1	0.9	0.5
Sim5	0.9	0.1	0.01
Sim6	0.9	0.1	0.5
Sim7	0.9	0.9	0.01
Sim8	0.9	0.9	0.05
Sim9	0.5	0.5	0.255
Sim10	0.5	0.5	0.255

Från dessa simuleringar erhålls kraft-förskjutningskurvorna som visas i Figur 33, där de heldragna linjerna representerar kraft-förskjutningsdata och de streckade linjerna motsvarande asymptotiska kraftnivåer.



Figur 33. Kraft-förskjutningskurvor för samtliga simuleringsfall i DOE-studien.

Av figuren framgår att hög friktion mellan partiklar och sliper i kombination med låg partikel-partikel-friktion under initialiseringen leder till hög asymptotisk kraftnivå. Den vertikala sättningen hos sleeper push-riggen för samtliga simuleringar visas i Figur 34.



Figur 34. Vertikal sättning hos sliper för de simuleringsfall som ingår i DOE-studien.

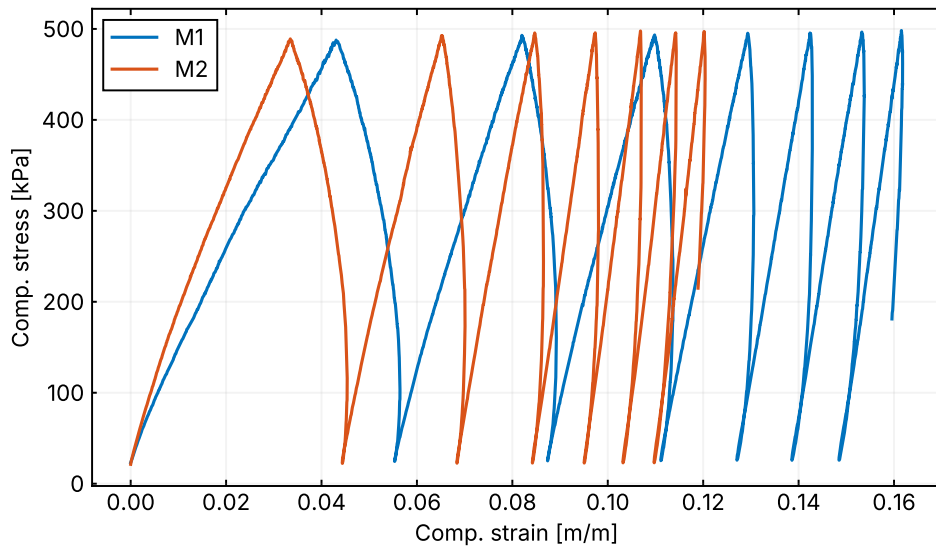
Figuren visar även att hög friktion mellan partiklar och sliper i kombination med låg partikel-partikel-friktion under initialiseringen ger mindre sättning. Resultaten indikerar dessutom att lägre restitution mellan partiklar och sliper ger en något reducerad sättning.

## 6.2 Oedometer Simulering

Figur 35 visar det simulerade spännings-töjningssvaret för materialen M1 och M2 (med skalad kornstorleksfördelning) under cyklisk trapezformad belastning i oedometersimuleringen över sju lastcykler. För båda materialen uppvisar töjningsresponsen en tydlig successiv ackumulering av permanent töjning med ökande antal lastcykler.

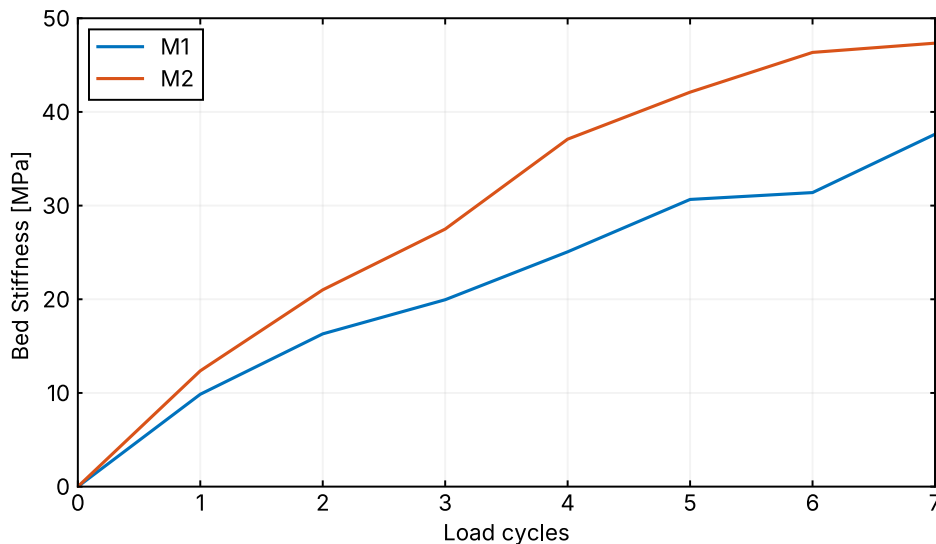
Eftersom endast de första sju cyklerna simuleras domineras beteendet huvudsakligen av initial partikelomlagring och packning av partikelstrukturen. I överensstämmelse med de experimentella resultaten i avsnitt 5.3 utvecklar M1 den största töjningen, medan M2 uppvisar mer begränsad deformation under samma antal cykler.

De simulerade töjningarna är dock större än de experimentellt uppmätta värdena. En möjlig förklaring är skillnader i initial provberedning och packningstillstånd. I simuleringarna reproduceras inte det jämnare och mer kompakterade ytskikt som erhöles experimentellt, vilket kan leda till ett lösare initialt packningstillstånd och därmed större initial deformation i simuleringarna.



Figur 35. Spännings-töjningskurvor för materialen M1 och M2 med skalad kornstorleksfördelning.

Figur 36 visar den motsvarande utvecklingen av bäddstyvheten över belastningscyklerna. I linje med de experimentella resultaten uppvisar M2 högre bäddstyvhet än M1 under de undersökta cyklerna. Detta indikerar att M2 bildar en stabilare partikelstruktur, vilket är konsistent med den lägre ackumuleringen av permanent töjning.

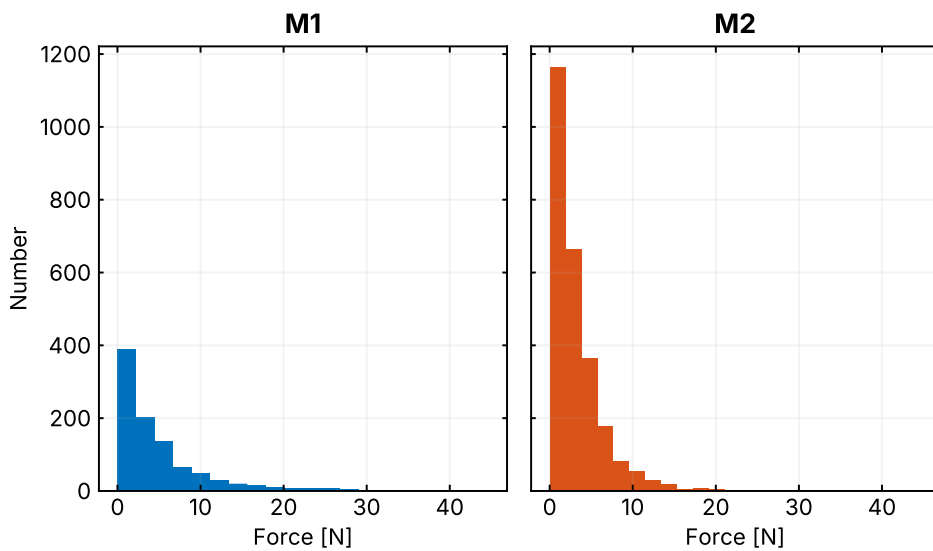


Figur 36. Bäddstyvhet för materialen M1 och M2 med skalad kornstorleksfördelning.

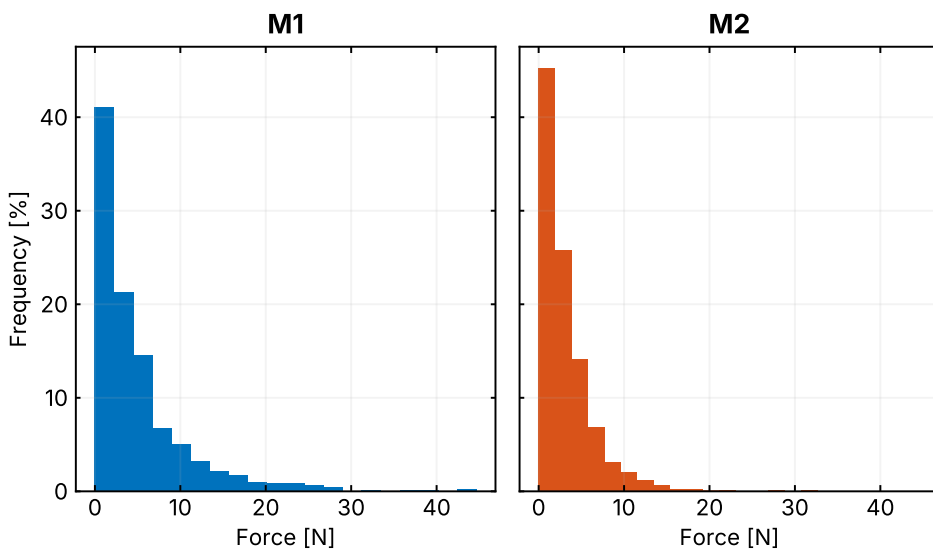
Partikelkraftfördelningarna vid den första spänningstoppen presenteras i Figur 37–Figur 39. Figur 37 visar att M2 innehåller ett större antal partiklar än M1, vilket är förväntat med tanke på den högre andelen mindre partiklar i materialet (se Figur 30). Eftersom den applicerade lasten fördelas över ett större antal partiklar blir den kraft som bärs av varje enskild partikel generellt lägre för M2.

Detta stöds ytterligare av frekvens- och kumulativa kraftfördelningar i Figur 38 och Figur 39. Jämfört med M2 uppvisar M1 en bredare kraftfördelning med en mer uttalad svans mot högre kraftnormer, vilket indikerar en mer lokaliserad lastöverföring genom högt belastade kontaktpunkter.

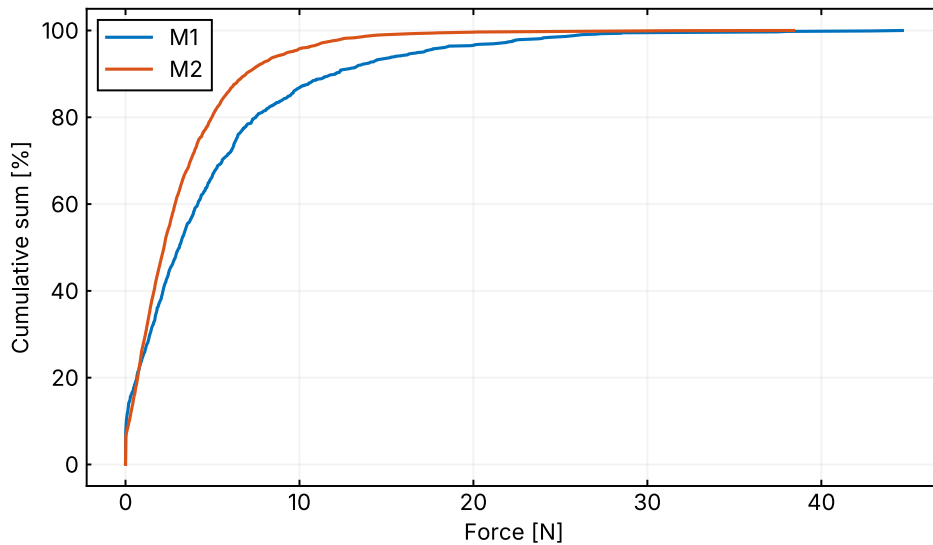
Detta ger en möjlig förklaring på partikelnivå till de experimentella observationerna, där M1 uppvisade större permanent töjning och mer omfattande nedbrytning, medan M2 visade lägre deformation och högre styvhet.



Figur 37. Antal partiklar som funktion av kraftnormsfördelning för materialen M1 och M2 med skalad kornstorleksfördelning.



Figur 38. Frekvens som funktion av kraftnormsfördelning för materialen M1 och M2 med skalad kornstorleksfördelning.



Figur 39. Kumulativ summa som funktion av kraftnormsfördelning för materialen M1 och M2 med skalad kornstorleksfördelning.

## 7 Jämförelse Mellan Experiment och Simulering

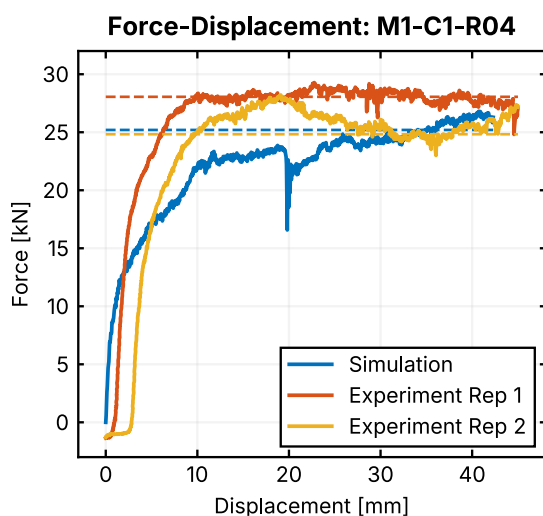
### 7.1 Jämförelse av kraftrespons

Baserat på DOE-analysen valdes en parameteruppsättning som representerar en rimlig kompromiss mellan kraftnivå och sättning. De valda parametrarna motsvarar hög friktion mellan partiklar och sliper, låg restitution samt låg initial partikel-partikel-friktion, vilka i DOE-studien identifierades som parametrar som ger högre asymptotisk kraft och reducerad sättning.

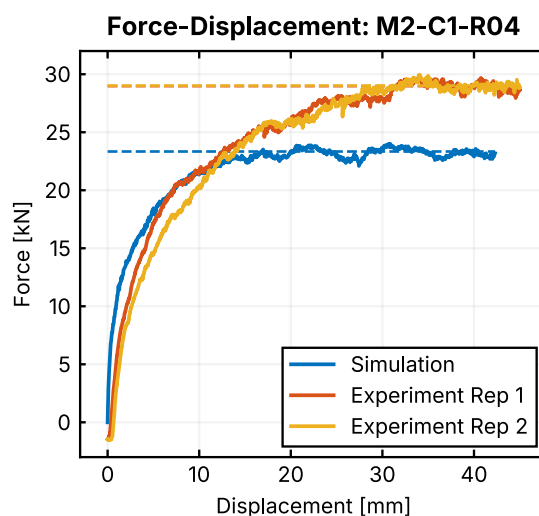
Med denna parameteruppsättning genomfördes ytterligare simuleringar för respektive material. Jämförelsen med motsvarande experiment visas i Figur 40–Figur 42.

Simuleringarna reproducerar den asymptotiska kraftnivån relativt väl för M1 och M2, även om kraftnivån för M2 är något underskattad. Även den övergripande formen på kraft-förskjutningsresponsen fångas relativt väl, med liknande kraftutveckling för M2 och M3, medan M1 uppvisar en något långsammare kraftuppbyggnad i simuleringarna.

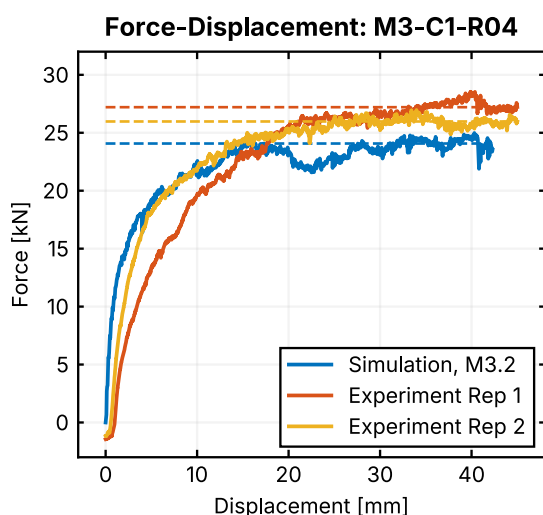
Motsvarande sättningsresultat presenteras i Figur 43.



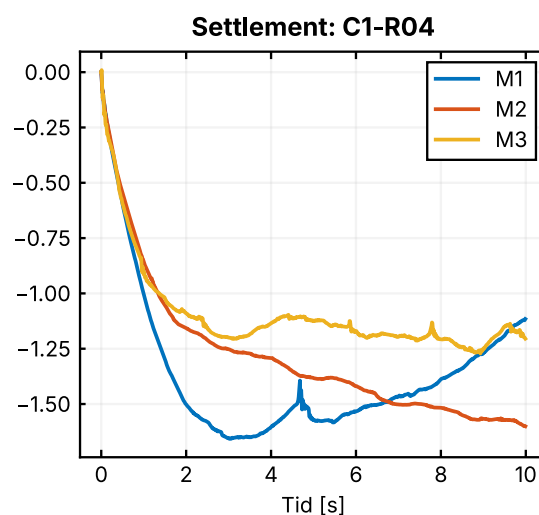
Figur 40. Jämförelse mellan simulering och experiment för kraft-förskjutningsresponsen hos M1.



Figur 41. Jämförelse mellan simulering och experiment för kraft-förskjutningsresponsen hos M2.



Figur 42. Jämförelse mellan simulering och experiment för kraft-förskjutningsresponsen hos M1.



Figur 43. Vertikal sättning hos sleeper push-riggen från simuleringarna.

## 7.2 Jämförelse mellan oedometersimuleringar och experiment

Oedometersimuleringarna genomfördes för M1 och M2, medan M3.2 inte inkluderades i jämförelsen. Diskussionen fokuserar därför främst på kvalitativa trender mellan simuleringar och experiment.

Det simulerade spännings-töjningssvaret (Figur 35) uppvisar samma materialrangordning som observerades experimentellt, där M1 visar större ackumulering av permanent töjning och M2 mer begränsad deformation. De absoluta töjningsnivåerna är högre i simuleringarna, vilket huvudsakligen tillskrivs skillnader i initial packning, men det relativa beteendet mellan materialen är konsistent.

En liknande trend observeras för bäddstyvheten (Figur 36), där M2 uppvisar högre styvhet än M1 genom belastningscyklerna. Detta indikerar att simuleringarna fångar kornstorleksfördelningens påverkan på stabiliteten hos partikelstrukturen.

Partikelkraftfördelningarna (Figur 37–Figur 39) ger dessutom en mekanistisk förklaring till dessa skillnader. M2 uppvisar en större andel partiklar som bär lägre krafter, medan M1 visar en bredare kraftfördelning med fler högt belastade kontaktpunkter. Detta tyder på en mer lokaliserad lastöverföring i M1, vilket är konsistent med den högre nedbrytningen och större töjningen som observerades experimentellt. Den mer distribuerade kraftkedjestrukturen i M2 överensstämmer däremot med dess lägre nedbrytning och högre styvhet.

## 8 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras från den föreliggande studien:

- Kornstorleksfördelningen påverkar både deformations- och fragmenteringsbeteendet hos järnvägsballast, vilket bekräftar att PSD är en relevant designparameter för ballastens funktion och långsiktiga prestanda.
- I de cykliska oedometerförsöken uppvisade standardballasten M1 störst permanent deformation, störst total omfördelning av material samt högst nedbrytningsindex. Den bredare graderingen M2 och den justerade bimodala graderingen M3.2 uppvisade lägre total nedbrytning.
- Det bimodala materialet M3.2 uppvisade relativt hög finmaterialhalt trots lägre total nedbrytning, vilket indikerar att olika kornstorleksfördelningar kan ge upphov till olika fragmenteringsmekanismer och inte enbart olika omfattning av fragmentering.
- I sleeper push testerna hade vertikalast och lateral inspanning större påverkan på det mobiliserade motståndet än de undersökta variationerna i kornstorleksfördelning. Inspanningen ökade framför allt den skenbara kohesionen, medan friktionsvinkeln förblev relativt likartad mellan materialen.
- DEM-simuleringarna reproducerade de huvudsakliga kvalitativa trender som observerades experimentellt, inklusive kraft-förskjutningsresponsen i sleeper push testerna samt den relativa rangordningen av deformation och styvhet mellan M1 och M2 i oedometersimuleringarna.
- DEM-resultaten indikerar att skillnader i kraftöverföring ger en möjlig partikelskale-förklaring till de experimentella resultaten: M1 utvecklar mer lokaliserade och högt belastade kontaktpunkter, medan M2 fördelar lasten över ett större antal partiklar.
- De genomförda simuleringarna utgör en användbar grund för jämförande DEM-analyser av ballastens kornstorleksfördelningar, men avsaknaden av explicit partikelkrossning begränsar möjligheten att direkt prediktera nedbrytning och generering av finmaterial.
- Det framtagna experimentella och numeriska datasetet utgör en värdefull grund för framtida kalibrering, validering och systematisk vidareutveckling av modeller för ballastens kornstorleksfördelning och partikelmorfologi.

## 9 Rekommendationer för framtida arbete

Den här studien utgör en initial utvärdering av alternativa kornstorleksfördelningar för ballast och är därför begränsad i omfattning. Resultaten visar att kornstorleksfördelningen har tydlig påverkan på både mekaniskt beteende och fragmenteringsprocesser, men de observerade trenderna visar samtidigt behovet av en mer systematisk undersökning av de styrande parametrarna.

Det nuvarande experimentella och numeriska ramverket möjliggör en sådan vidareutveckling. Genom etablerade provmetoder och motsvarande DEM-modeller för både oedometer- och sleeper push-konfigurationer finns nu en grund för att utöka analysen mot en mer omfattande representation av hela provprogrammet, vilket möjliggör närmare koppling mellan experimentella förhållanden och numerisk utvärdering.

Den tillgängliga modelleringskapaciteten möjliggör dessutom en betydligt bredare utforskning av designrymden än vad som är praktiskt genomförbart experimentellt. Detta inkluderar systematiska variationer av graderingsbredd, bimodalitet, karakteristiska storleksintervall och partikelmorfologi, med möjlighet att analysera deras påverkan ur flera perspektiv, såsom mekanisk prestanda, nedbrytningsbeteende och produktionsrelaterade aspekter.

Studien visar samtidigt tydliga fördelar med att komplettera de nuvarande provningskonfigurationerna med större experimentella uppställningar, vilket skulle möjliggöra tester vid mer representativa partikelstorlekar och spänningsnivåer. Sådana utvidgningar skulle stärka kopplingen mellan laboratorieskale-observationer och fältrelevant beteende, särskilt avseende deformationsmekanismer och partikelkrossning.

Även om DEM-modellerna fångar de dominerande mekaniska trenderna krävs ytterligare vidareutveckling för att förbättra den kvantitativa överensstämmelsen, särskilt för oedometerresponsen. Framför allt skulle inkludering av explicit partikelkrossning samt en förbättrad representation av initiala packningstillstånd möjliggöra en mer komplett beskrivning av ballastens långsiktiga beteende.

## 10 Referenser

- Berggren, E. (2009). Railway Track Stiffness: Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance [Doctoral thesis, comprehensive summary, KTH]. *In Trita-AVE* (2009:17). DiVA. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-10360>
- Dehlbom, B., Håkansson, S., & Berggren, E. (2018). *Förbättring av bärighet hos befintliga järnvägsanläggningar* (Issue 1.1-1604-0296).
- Göransson, M. (2018). *Kritiska egenskaper hos bergmaterial och alternativa material* (Issue Rapport nr 2014-04247).
- Indraratna B., Ionescu D., & Christie H. D. (1998). *Shear Behavior of Railway Ballast Based on Large-Scale Triaxial Tests*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(5), 439–449. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:5\(439\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:5(439))
- Indraratna, B., Sun, Y., & Nimbalkar, S. (2016). *Laboratory Assessment of the Role of Particle Size Distribution on the Deformation and Degradation of Ballast under Cyclic Loading*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(7), 04016016–04016016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001463](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001463)
- Lundqvist, A., & Dahlberg, T. (2005). *Railway track stiffness variation—Consequences and countermeasures*. 19th IAVSD Symposium of Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 2005. DiVA. 19th IAVSD Symposium of Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Milano, August 29–September 2, 2005. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-41855>
- Marsal Raúl J. (1967). *Large Scale Testing of Rockfill Materials*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(2), 27–43. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000958>
- Rosa, A. F., Aragão, F. T. S., & da Motta, L. M. G. (2021). *Effects of particle size distribution and lithology on the resistance to breakage of ballast materials*. *Construction and Building Materials*, 267, 121015–121015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121015>
- SIS. (2003). SS-EN 13450—*Aggregates for railway ballast*. (SS-EN 13450).
- Trafikverket. (2015). BVS 585.52—*Makadamballast för järnväg* (Version 1.0). Trafikverket.
- Trafikverket. (2020). *TRVINFRA-00019 Banöverbyggnad Makadamballast* (Version 1.0) [Krav infrastrukturegelverk]. Trafikverkets infrastrukturegelverk.