

Utläggning och provtagning av obundet bärlager

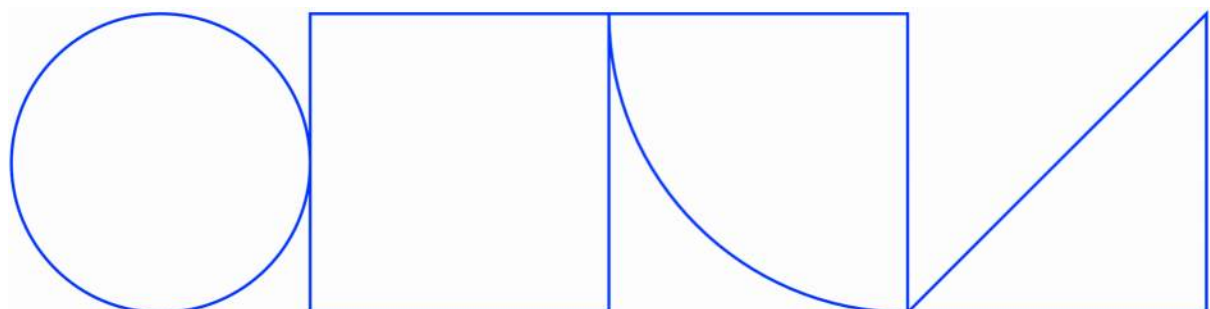
Simulering med hjälp av DEM

Gustav Kettil, Johannes Quist
Fraunhofer-Chalmers Centre
Jan Englund
Skanska Sverige AB

2024-11-12



FRAUNHOFER CHALMERS
RESEARCH CENTRE FOR INDUSTRIAL MATHEMATICS



Förord

Projektet är en inledande studie över simulering med hjälp av diskret elementmetod (DEM) av utläggning och provtagning av obundna material. I denna inledande studie tas simuleringsmetodiker fram och jämförs med resultat framtagna i SBUF-projekt 14067 "Mottagningskontroll av obundna vägmateriäl". De framtagna simulerings- och provtagningsmetodikerna ska utvecklas i efterföljande etapp 2 av projekt med olika utläggningstekniker. I efterkommande projektetapper kommer även utläggningstekniker på olika material studeras, där framförallt grovkornigare material och cirkulära material är av intresse.

Ett stort tack riktas till medlemmarna i referensgruppen som hjälpt till med att vägleda projektet och kommit med givande återkopplingar och deltagit i goda diskussioner. Slutligen riktas ett mycket stort tack till SBUF och Trafikverket, som varit finansiärer av projektet och möjliggjort dess genomförande. Projektets organisation var:

Arbetsgrupp:

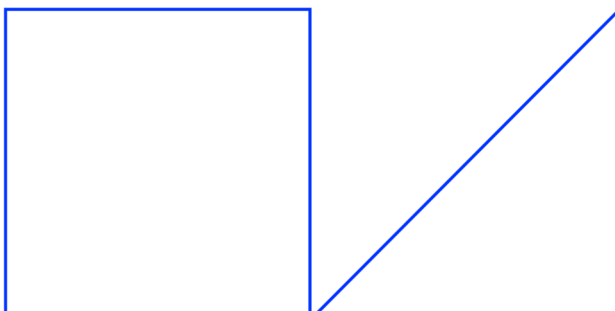
Jan Englund	Skanska, specialist obundna material, Projektledare
Johannes Quist	FCC, specialist digital simulering, Arbetapaketedare DEM
Gustav Kettil	FCC, specialist digital simulering, Tillämpad forskare DEM

Referensgrupp:

Klas Hermelin	Trafikverket, specialist obundna material
Fredrik Hellman	VTI, specialist vägtekniik
Jonas Ekblad	NCC, specialist vägkonstruktion
Peter Martinsson	Swerock, specialist obundna material
Jacob Källström	Svevia, specialist laboratorieanalyser
Lars Stenlid	Skanska, specialist obundna material

Johannes Quist, Gustav Kettil och Jan Englund

Göteborg 2024-11-12



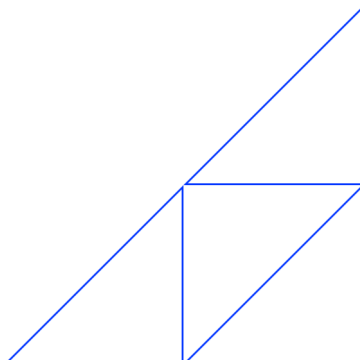
Sammanfattning och slutsatser

Projektets syftar till att ge underlag för råd och rekommendationer ("Best practice") riktat till anläggningsentreprenörer och infrastrukturägare vid utläggning och provtagning av obundna material samt utveckla metodik för att simulera framtida utläggning av cirkulära material, för att undvika separering. Separering av obundet material i exempelvis en vägkonstruktion medför att vissa partier kommer innehålla för fint material och andra partier blir för grovkorniga och ensgraderade. Båda delarna har en negativ inverkan på stabilitet och styvhet på det obundna lagret. Detta kan i sin tur leda till ökad spårbildning och uppsprickning av de ovanliggande bundna lagren med påverkan på konstruktionens funktion.

Utgångspunkten i aktuellt projekt är utläggning och provtagning av bärlager med kornstorleksfördelning 0–32 mm. Genom simuleringar med hjälp av diskret elementmetod (DEM) går det reda ut hur olika utläggningsmetoder påverkar kornstorleksfördelningen i olika punkter samt genom DEM ta reda på bästa sättet att ta ut prov för att verifiera detta. Därmed går det minska behovet av fullskaliga fysiska "trial and error"-försök. Det blir därmed lättare att studera även grovkorniga material som är svåra att verifiera, exempelvis 0-150 och 0-300 men även cirkulära material, vars utläggningsegenskaper kan skilja sig åt från jungfruliga.

Projektresultaten ger att DEM-simuleringar kan visa på segrereringseffekter vid olika utläggningstekniker och resultaten sammanfaller med de som framkom i SBUF-projekt 14067, "Mottagningskontroll av obundna vägmateriäl". Följande slutsatser kan dras från projektets simuleringsresultat:

- "Utströssling" av material gav minst separering (jämnast kvalitet) men efterföljande "avjämning" av ytan ger separering.
- Att lägga upp materialen i högar och dra ut åt olika håll innebär alltid separering men här är det fördelaktigare att lägga upp i flera små högar som sedan dras ut.
- Riktningen av utdragen har en påverkan då lossningen av material med hjullastare orsakar en separering. Finare partiklar har en tendens att hamna närmare lastmaskinen och grövre längre bort från lastmaskinen. Utdragning bakåt åt materialhögens "finkornigare" del ger minst separering.
- På en idealt perfekt utlagd yta kommer, vid provtagning av ett prov på 30 kg, riskera 5 % av proverna att vara underkända utifrån Trafikverkets kravställning på obundet bärlager beroende på var på ytan provet tas. Ett prov behöver innehålla ett tillräckligt antal partiklar så att alla storlekar är representerade i samma mängdfördelning som i den totalt utlagda volymen.



Innehåll

1	Bakgrund	4
2	Mål och syfte	9
3	Metodik	10
3.1	Diskret element-metod	10
4	Kalibrering av materialmodell	12
5	DEM-simulering av ideal referensutläggning	14
5.1	Problem 1 – generationsvolym (provmängd)	21
5.2	Problem 2 – volymfraktion för generatordomän	24
5.3	Problem 3 – randeffekter hos generatordomänen	26
5.4	Referensbäddar	31
6	DEM-simulering av utläggningsscenario	38
6.1	Utbredning av kvadratisk provyta	38
6.2	Utbredning i kanalyta	45
6.2.1	Resultat en hög	47
6.2.2	Resultat två högar	50
6.2.3	Resultat strössling	53
7	Diskussion och slutsatser	58
8	Fortsatta studier	60
9	Referenser	61

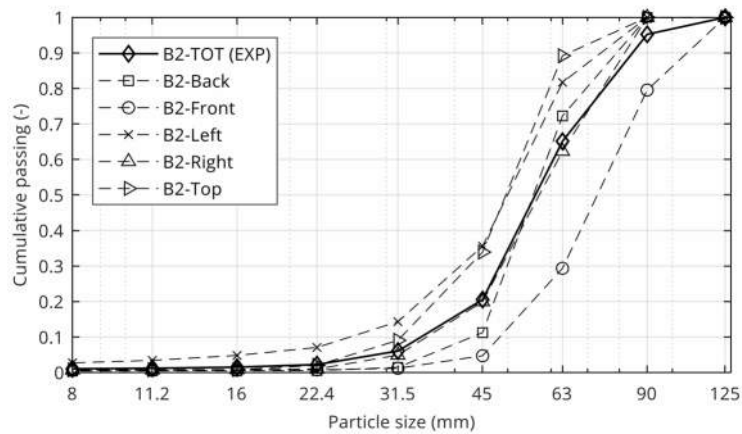
1 Bakgrund

En väg eller en annan typ av anläggningskonstruktion måste ur ett samhällsekonomiskt perspektiv konstrueras så att önskvärd funktion upprätthålls under den tänkta livslängden och en anläggningsentreprenör måste kunna bygga upp konstruktionen på ett effektivt sätt så att en förutsägbar funktion skapas. Vid exempelvis utläggning av obundna lager i en konstruktion, är det viktigt att dessa läggs ut utan att separationer uppstår (ansamling av grovkornigare material i vissa partier och finkornigare material i andra). En ny utmaning är användandet av "nya" cirkulära material i exempelvis de obundna lagren och hur dessa ska hanteras för att undvika separationer. Separation med avseende på partikelstorlek kan leda till felaktig funktion för de obundna lagren som i sin tur kan leda till dyra kostnader för infrastrukturägare (exempelvis Trafikverket) men även för en entreprenör, som behöver åtgärda felaktigheter under en garantitid. För att främja ett hållbart byggande är det därmed viktigt att bygga med rätt funktion och kontrollera denna.

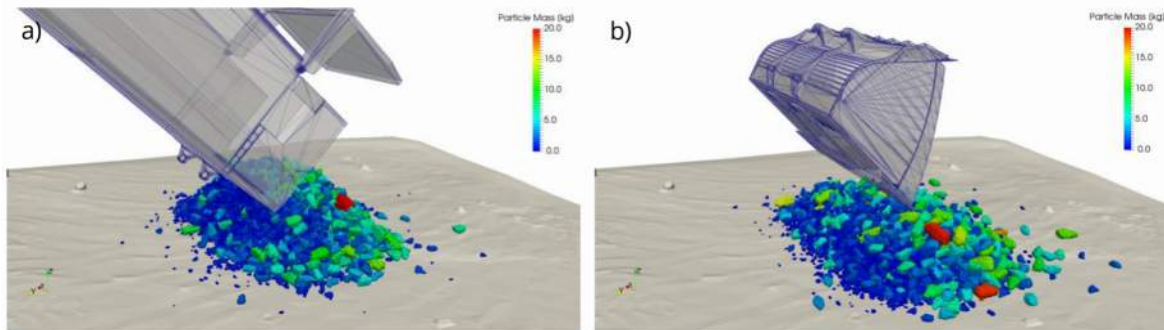
Exempel på funktioner hos obundna material är styvhet (lastspridningsförmåga), stabilitet (motståndskraft mot spårbildning) och permeabilitet. Ett obundet bärlager ska vara vattengenomsläppligt så att vatten som eventuellt kommer in i konstruktionen kan dräneras bort och inte kapillärt tas upp i konstruktionen. Närvaro av vatten bryter ned vägkonstruktionen och ökar risken för tjälproblematik. För mycket finmaterial i förhållande till grövre korn minskar styvheten och stabiliteten och för lite finmaterial minskar stabiliteten då det inte finns tillräckligt med små korn som håller de större kornen på plats [1]. Detta kan leda till permanent deformation på vägytan i form av spårbildning men även uppsprickning av de ovanpåliggande bundna lagren. Sker detta, minskar vägens livslängd och det kan bli dyrbart att åtgärda obundna lager i konstruktionen.

I exempelvis SBUF-projekt 13820, "Undersökning av separationseffekter vid kompaktering av obundna material", som genomfördes av Fraunhofer-Chalmers Centre (FCC), studerades effekten av att obundna material är separerade och hur kompakteringen av materialet till önskvärd funktion påverkades negativt av separationen [2].

Förutsatt en homogent producerat material kan separation i obundna material uppstå i olika skeden, allt ifrån lossning av materialet till utdragningen av det till ett lager. Ett från början homogent material kan med andra ord separeras i olika grad beroende på hur materialet hanteras. Hur obundna material separerar vid bland annat lossning har studerats i SBUF-projekt 13638, "Segregering av bergmaterial vid avlastning" [3]. En tydlig separationseffekt uppträder vid avlastning från hjullastare eller bergflakbil där finare gradering uppträder i högen närmast fordonet och grövre gradering på den sida av högen som är längst bort från fordonet, se Figur 1 och Figur 2. I det projektet användes diskret elementmetod (DEM) för att simulera olika avlastningsförfarande och i SBUF-projekt 13820 användes samma metodik för att simulera effekten av separering av obundna material vid efterföljande kompaktering.

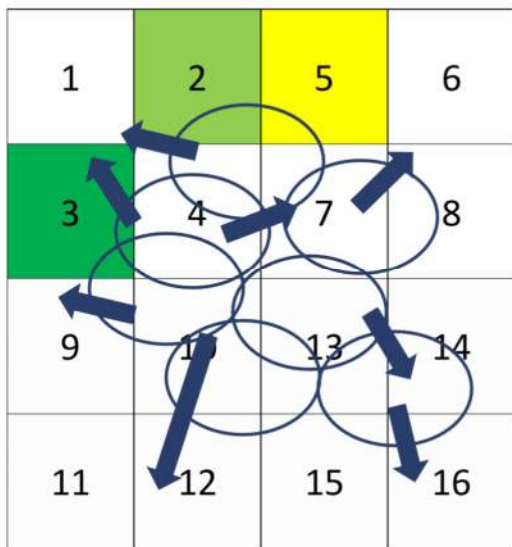
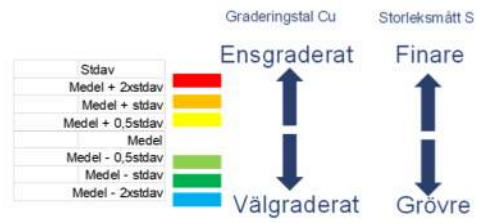


Figur 1. Exempel på storleksfördelning från segregerad hög efter fullskaligt lossningsexperiment [3].

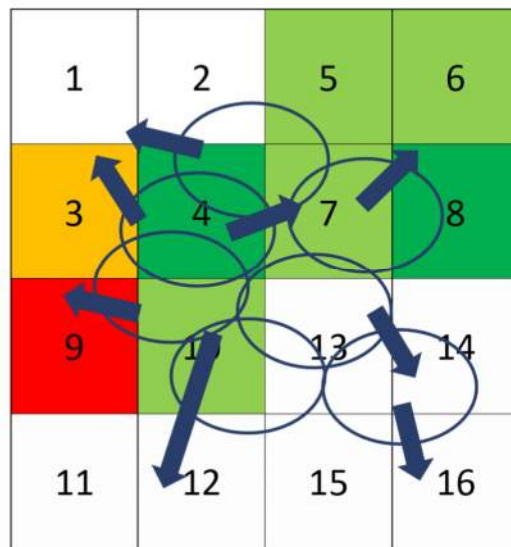


Figur 2. Simulering av materiallossning från bergflakbil (a) och hjullastarskopa (b).

I SBUF-projekt 14067, "Mottagningskontroll av obundna vägmateriäl", beskrevs vikten av att ta ut prover i samband med att materialet kommer till ett anläggningsprojekt för att säkerställa att det går att skapa rätt produkt av det levererade materialet [4]. Det framkom även att kornstorleksfördelningen i olika punkter i en provyta påverkas av utläggningstekniken, se Figur 3 och Figur 4. En slutsats var att vad som orsakar denna separering skulle behöva utredas ytterligare.

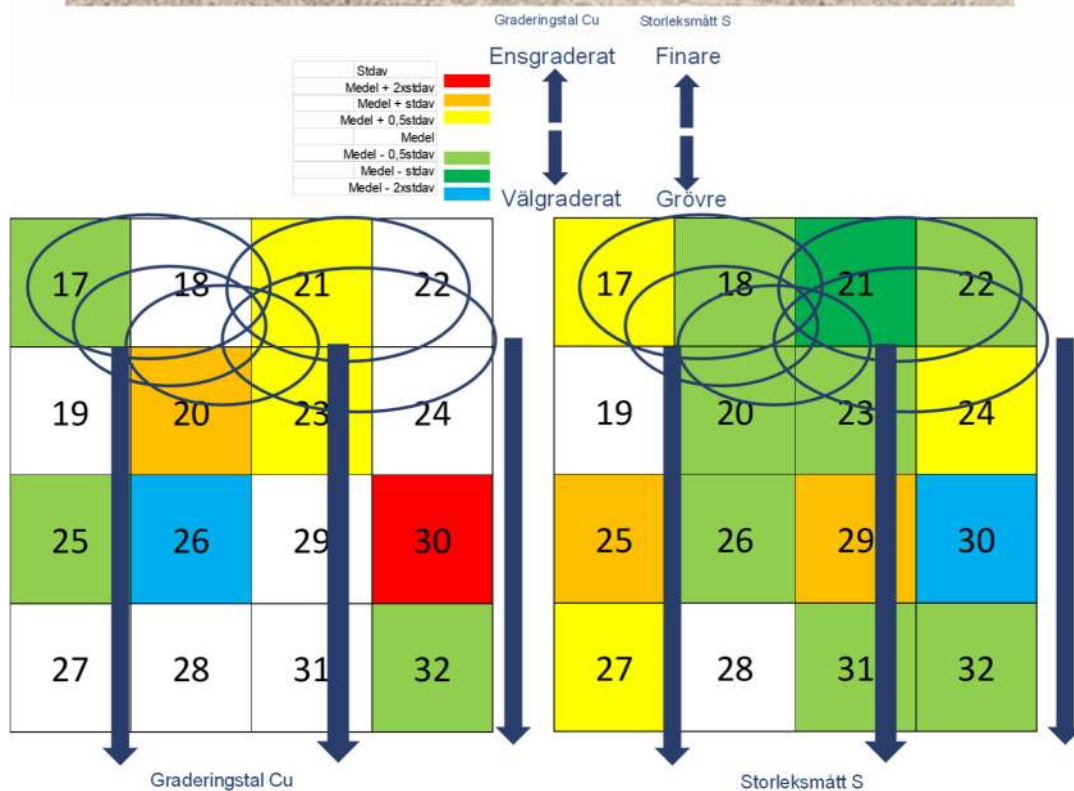


Graderingstal Cu



Storleksmått S

Figur 3. Bild och illustration av försök från projekt 14067. Små högar som drogs ut åt olika håll.



Figur 4. Bild och illustration av försök från projekt 14067. Stora högar som drogs ut åt ett håll i långa dra.

I och med att kornstorleksfördelningen är väsentlig för vägkonstruktionens funktion, kontrolleras denna på utlagt material genom provtagning, vilket är ett krav och föreskrivs enligt exempelvis TDOK 2013:0530 Obundna lager för vägkonstruktioner [5]. Detta för att entreprenören ska kunna följa upp att rätt utläggningsteknik används, samt att verifiera färdigt lager åt beställaren. För att göra detta behöver prover tas ut på rätt sätt och på rätt ställen. Provtagningsförfarandet påverkar hur utläggningförfarandet kan verifieras. I provmetoden för siktning SS-EN 933-1 anges minsta provmängd för analys av kornstorleksfördelning beroende av största

kornstorlek [6]. Detta baseras på att det ska finnas tillräcklig mängd stora korn i provet för att analysen av kornstorleken ska bli repeterbar. Var gränsen går för detta beror i sin tur på kornstorleksfördelningen och hur provet tas ut. Hur provet ska tas ut på färdigutlagt och packat lager beskrivs i TDOK 2014:0151 Provtagning av obundna material [7]. Det är därför intressant att ta reda på var gränsen för repeterbarheten går. Detta skulle kunna göras genom simuleringar med hjälp av DEM.

Sammantaget leder detta till att det finns behov av att se över separeringsproblematiken i obundna material och speciellt med hänsyn till användandet av cirkulära material i stället för jungfruliga, då dessa kan behöva läggas ut på annat sätt. Mycket vore att tjäna på att göra detta genom simuleringar istället för storskaliga fysiska "trial and error"-försök samt hitta bästa sätten att provta för att verifiera produkten. Ett naturligt fortsatt steg för detta är att med DEM utvärdera olika utläggningsmetoders prestanda för att reducera separation, samt hur den efterföljande provtagningen faller ut. Eftersom virtuell provtagning från en simulerad utläggning kan göras med godtycklig provvolym och antal prover öppnas möjligheten för statistisk analys av provtagningsutmaningen.

2 Mål och syfte

Projektet syftar till att ge underlag för råd och rekommendationer ("Best practice") riktat till anläggningsentreprenörer och infrastrukturägare vid utläggning och provtagning av obundna material samt metodik för att kunna simulera utläggning av olika typer av material som grovkorniga samt cirkulära material. Utgångspunkten i aktuellt projekt är utläggning och provtagning av bärlager med kornstorleksfördelning 0–32 mm.

Genom simuleringar med hjälp av diskret elementmetod (DEM) går det att reda ut hur olika utläggningsmetoder påverkar kornstorleksfördelningen i olika punkter samt ta reda på bästa sättet att ta ut prov för att verifiera detta. DEM-simuleringarna verifieras med utvalda fältmätningar.

3 Metodik

Projektet genomförs i två etapper. Denna rapport redovisar resultat och slutsatser från aktiviteterna i etapp 1. Den huvudsakliga metodiken som nyttjas i projektet är baserad på den diskreta element metoden (DEM). Därför redovisas metoden och implementationen övergripande nedan. Därefter följer en kort beskrivning av de tre huvudaktiviteterna i etapp 1. De tre aktiviteterna är:

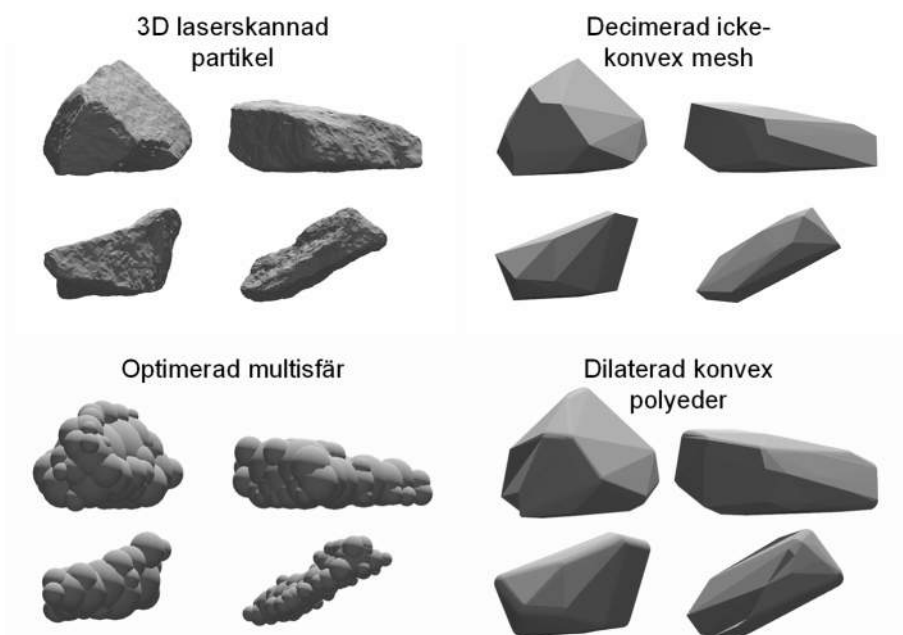
- **Kalibrering av materialmodell** – detta genomförs för att säkerställa god representation av bergmaterialet i modellen.
- **DEM-simulering av ideal referensutläggning** – detta genomförs för att kunna utvärdera utläggningsmetoderna och då simuleras en ”perfekt” utläggning som referens med ett så homogent material som möjligt, där själva utläggningstekniken inte har en påverkan. Simuleringsmetoden möjliggör en nominellt ideal materialbäddsgenerering som är helt slumpmässig över hela ytan utan påverkan av hanteringseffekter. Detta möjliggör skapandet av en ideal referensyta med efterföljande virtuell provtagning och kornstorleksanalys.
- **DEM-simulering av utläggningsscenario** – detta genomförs för att ta fram simuleringsmetodiker för att simulera olika utläggsscenarioer och jämföra dessa DEM simuleringar med de experiment som tidigare genomförts i SBUF projekt 14067.

3.1 Diskret element-metod

Arbetet i detta projekt använder till stor del den numeriska metoden DEM. Beskrivningen nedan riktar sig både till de läsare som vill få en övergripande förståelse för metoden, samt för de som i liknande eller relaterade frågeställningar nyttjar DEM som metod. Den diskreta elementmetoden (DEM) är en numerisk teknik för att modellera partikelsystem och förutsäga deras rörelse och krafter [8, 9]. Metoden har historiskt använts för en rad industriella problem och har, tack vare den ökande datorkraften, kunnat tillämpas på allt större och mer komplexa problem. I metodens tidiga tillämpningar användes främst sfäriska former för att modellera partiklarna, och senare även kompositfärer, så kallade multisfärer. Den sfäriska partikeln har fördelen av enkel beräkning; kraften mellan sfäriska partiklar kan enkelt bestämmas som en funktion av små överlapp mellan sfärerna. Emellertid är sfäriska partiklar också begränsande eftersom både den statiska och dynamiska karaktären hos oregelbundna partiklar till stor del styrs av deras form. I viss mån kan bristen på form kompenseras med ökad friktion, rullfriktion och/eller kohesion mellan partiklarna, men detta medför både matematiska och simuleringsmässiga nackdelar.

Under de senaste åren har DEM snabbt utvecklats för att inkludera modeller för polyedriska partiklar [10] [11]. Sedan 2016 har FCC utvecklat sin egen DEM-programvara, Demify®, som från början baserades på sfäriska partiklar men som sedan 2020 även kan simulera polyedrar och sedan 2021 dilaterade polyedrar, se Figur 5. Under våren 2020 genomfördes ett examensarbete vid FCC där studenten Adam Billock, tillsammans med handledare Klas Jareteg, utvecklade en DEM-lösare för att

simulera polyedrar med hjälp av grafikkort (GPU). För en fullständig beskrivning av denna lösare och dess funktioner hänvisas till projektets slutrapport [12].



Figur 5. Fyra partikelformer relevanta för DEM-modellering av bergmaterial

I detta arbete används den så kallade dilaterade polyeder (DP)-metoden [13]. I DP-metoden sveps en sfär över trianguleringen av ett konvext nät, vilket gör kontaktberäkning och interaktionskrafter betydligt snabbare än metoder med volymetriskt överlappande, icke-konvexa polyedrar. En nackdel med DP-metoden är att viss oregelbundenhet hos partikeln går förlorad när det konvexa höljet används, och dilateringen resulterar i en mer rundad partikel, vilket kan minska partikelpopulationens skjuvmotstånd. Detta gör simuleringarna snabbare, men till viss del på bekostnad av modellens noggrannhet och förutsäggelseförmåga.

För att nå industriellt relevanta resultat är alla delar av Demify optimerade för beräkningar på grafikkort (GPU), vilket möjliggör massivt parallella beräkningar på ett energi- och kostnadseffektivt sätt. Med välformulerade algoritmer kan prestandan på en GPU mångdubbelt överträffa en CPU. Förutom en unik implementering av kontakter och överlapp för polyedrar används ett snabbt sökträd som effektivt filtrerar bort icke-kolliderande objekt, vilket ytterligare optimerar beräkningen av krafter mellan partiklar.

Det strukturerade arbetet med kod, skript och modeller i projektet möjliggörs genom Demifys "Application Programming Interface (API)" i programmeringsspråket Python. De skript och analyser som utvecklats kan därmed exempelvis köras på beräkningskluster samt versionshanteras på ett professionellt sätt. Detta är viktigt för det iterativa utvecklings- och förbättringsarbetet.

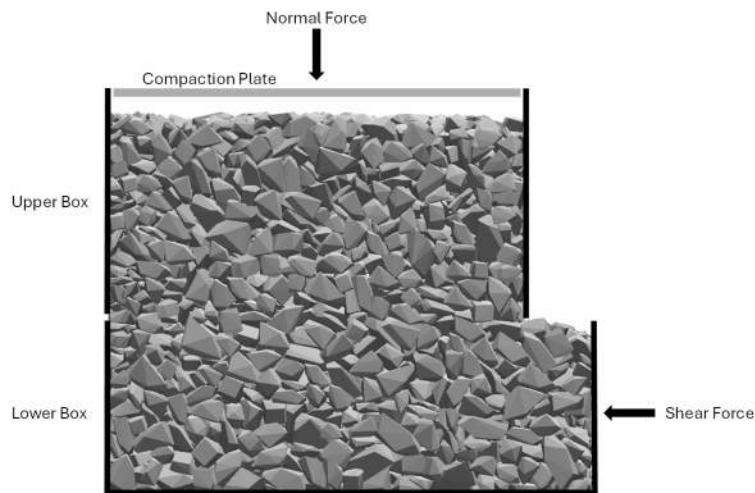
4 Kalibrering av materialmodell

Materialparametrarna som används i DEM-simuleringarna i detta projekt är baserade på kalibreringsdata från ett direkt skjuvförsök. Detta försök syftar till att bestämma skjuvhållfastheten och används i denna studie för att kalibrera simuleringsparametrar för bergmaterial. För att kalibrera simuleringsparametrarna jämförs spännings-töjningskurvorna med experimentella data från litteraturen [14].

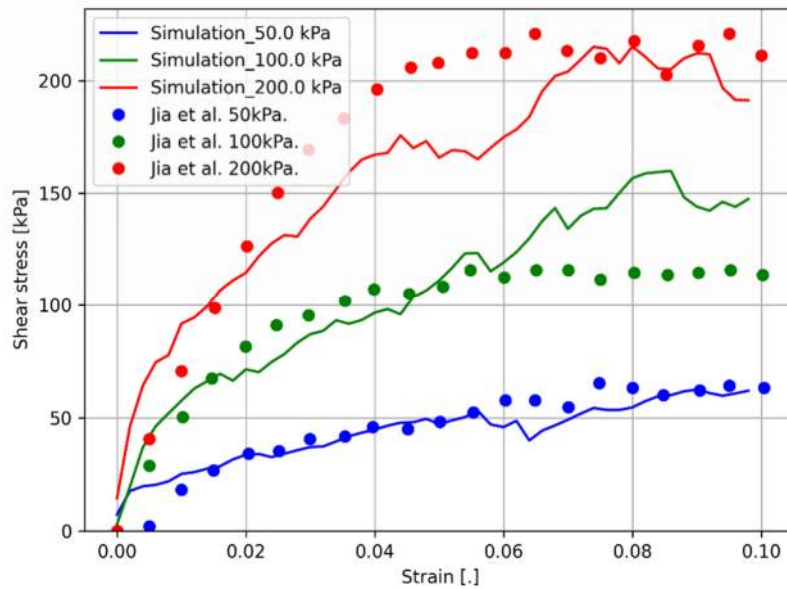
Simuleringen är uppbyggd enligt experimentuppställningen i Jia et al. [14], som ses i en schematisk bild av det direkta skjuvförsöket i Figur 6. Bergmaterialet placeras i en stålbehållare uppdelad i en övre och en nedre låda. Övre lådan har en storlek av $0.6 \times 0.6 \times 0.3 \text{ m}^3$ (vidd x bredd x höjd) och nedre lådan har en storlek av $0.6 \times 0.7 \times 0.25 \text{ m}^3$. En kompakteringsplatta belastas med en normalspänning för att kompaktera bergmaterialet i den övre lådan. I experimenten utvärderas normalspänningar av 50, 100 och 200 kPa på kompakteringsplattan. Samtidigt appliceras en horisontell skjuvkraft, som gör att den nedre lådan rör sig med konstant hastighet av 0.05 mm/s i skjuvriktningen. Skjuvspänningarna utvärderas enligt krafter som verkar på sidan i skjuvriktningen av övre lådan delad på sidans area tills en töjning av 10 % har nåtts, som motsvarar en förskjutning av nedre lådan på 0.06 m. I simuleringarna accelereras upplägget med en hastighet av 6 mm/s för att minska beräkningstiden. En förstudie visade att toppspänningen blir upprätthållen trots accelererade rörelse av nedre lådan.

Simuleringarna utfördes med mjukvaran Demify. Det simulerade bergmaterialet följer storleksfördelningen av Kategori A för järnvägsmakadam enligt SIS [15] med en minimal storlek av 22.5 och en maximal storlek av 63 mm och har packats till en packningsdensitet av 0.7 enligt experimenten. Densiteten av partikelmaterialet är 2700 kg/m^3 , som motsvarar densiteten av granit. I simuleringen används en partikelmodell som kräver konvexitet av partiklarna och därmed är representativ för avrundade partiklar, därför jämförs resultaten med de experiment av Jia al. [14] där just återvunnet ballastmaterial undersöktes.

Som visas i Figur 7 för normalspänningar av 50, 100 och 200 kPa stämmer simuleringsresultaten (genomdragen linje) mycket väl överens med experimentella data (prickar), vilket bekräftar att materialet är korrekt kalibrerat och kan användas för vidare studier. De slutliga simuleringsparametrarna är listade i Tabell 1.



Figur 6. Illustration av direkt skjuvförsök.



Figur 7. Jämförelse av spännings-töjningskurvor mellan simuleringar och experimentella resultat.

Tabell 1. Kalibrerade simuleringsparametrar.

Parameter	Värde	Enhet
Partiklars elasticitetsmodul	10	GPa
Partiklars Poissons konstant	0.3	-
Friktionskoefficient för interaktion mellan partiklar	0.8	-
Friktionskoefficient för interaktion mellan partikel och stål	0.8	-
Dämpningskoefficient för interaktion mellan partiklar	0.7	-
Dämpningskoefficient för interaktion mellan partikel och stål	0.7	-
Tidssteg	1e-6	s

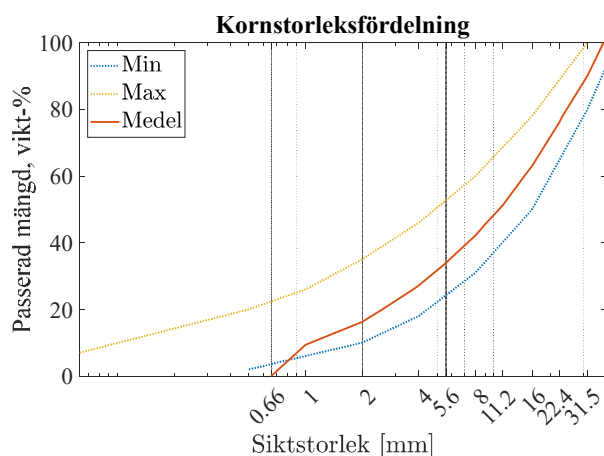
5 DEM-simulering av ideal referensutläggning

I denna del studeras ideal utläggning av bergmaterial och statistisk analys utförs av resulterande storleksfördelningar. Vid utläggning av bergmaterial förändras storleksfördelningen hos materialet i flera steg, exempelvis vid olika på- och avlastningsmoment, utläggning, eller utbredning. Vid byggnation av obundna lager är det viktigt att materialet ej har segregerat eller separerat i för hög utsträckning. För att säkerställa detta tas prover på olika positioner och jämförs med gränsvärdesfördelningar.

Analysen i detta arbete utgår i de flesta fall från en referens-storleksfördelning som ses i Figur 8. Fördelningen är framtagen som ett medelvärde av min och max av gränsvärdesfördelningar av passerad mängd y [vikt-%] enligt Trafikverkets TDOK 2013:0530 [5]. Medelvärde beräknas horisontellt (i stället för vertikalt) så att följande relation är uppfylld

$$F_{medel}^{-1}(y) = \frac{F_{min}^{-1}(y) + F_{max}^{-1}(y)}{2}, \quad (1.1)$$

där F^{-1} betecknar inversen av en kumulativ fördelningsfunktion. Notera att storleksfördelningar är volymbaserade (eller ekvivalent massbaserade) om inte annat anges. Medelfördelningen trunkeras vid 0.66 mm som bestämdes vara minsta tillåtna partikelstorlek i denna analys.

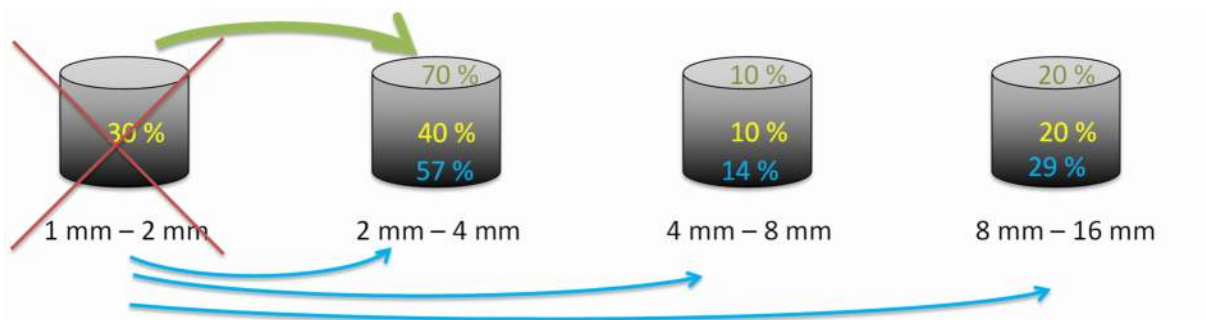


Figur 8. Den medelkornstorleksfördelning som används som referens för studie av ideal referensutläggning i tillsammans med gränsvärdesfördelningar för min och max.

I DEM-simuleringar är antalet partiklar avgörande för beräkningsprestandan. För stort antal partiklar kan ej hanteras på grund av minnesbegränsningar. Detta är viktigt att beakta då storleksfördelning väljs för en simulering. Den undre gränsen påverkar

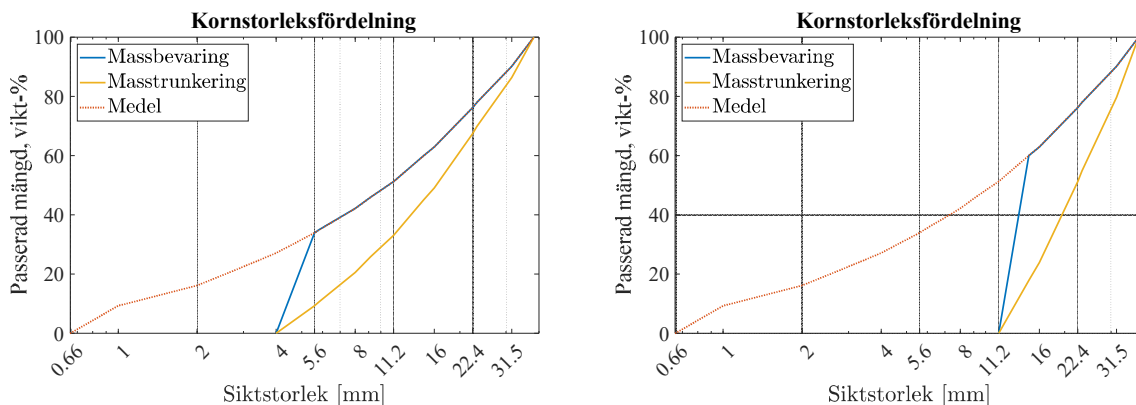
antalet partiklar för en given massa. Ju större minsta tillåten partikelstorlek som väljs, desto större total massa kan simuleras vid samma minnesmängd då större partiklar har mer massa och volym vid samma antal partiklar. Därför kommer det i de flesta situationer vara nödvändigt att öka minsta tillåtna partikelstorlek från ovan nämnda 0.66 mm. När minsta partikelstorlek ökas behöver fördelningen omvandlas. Nedan beskrivs två alternativ med ett exempel.

Låt skålarna i Figur 9 beskriva en storleksfördelning. Exempelvis utgör partiklar med storlek 2–4 mm 40 vikt-% av den totala fördelningen. Om den minsta storleksskålen, i detta fall 1–2 mm, skall tas bort och den nya undre gränsen ska bli 2 mm föreslås två alternativ. I alternativ 1 adderas den borttagna vikt-% (30 i detta exempel) till den nästliggande storleksskålen. Då blir den nya vikt-% 70 för skål 2–4 mm. I alternativ 2 raderas den borttagna skålens viktprocent. Då behöver alla kvarvarande skålars viktprocent normaliseras för att åter summera till ett. Alternativ 1 benämns här massbevaring och alternativ 2 benämns masstrunkering.



Figur 9. Exempel på en storleksfördelning med fyra storlekklasser och dess ursprungliga viktprocent i gul text. Om undre storleksgränsen ändras till 2 mm behöver fördelningen justeras. Alternativ 1 illustreras med grönt och där flyttas viktprocenten över till nästa skål. Alternativ 2 illustreras med blått och där raderas den borttagna skålens viktprocent. Då behöver övriga skålars viktprocenter normaliseras för att summera till ett.

I Figur 10 visas resulterande storleksfördelningar för alternativen massbevaring och masstrunkering när minsta partikelstorlek väljs till 4 mm respektive 11.2 mm. Notera att för massbevaring följer den nya fördelningen den gamla fördelningen för de större storlekklasserna, till skillnad från masstrunkering som avviker för alla storlekar. I detta arbete kommer alternativ 1, massbevaring, användas fortsättningsvis.



Figur 10. Kornstorleksfördelningar för fall där minsta tillåtna partikelstorlek höjs jämfört med medelfördelningen. Två metoder för att modifiera fördelningarna, massbevaring och masstrunkering, visas tillsammans med referensfördelningen. Till vänster ändras minsta storlek till 4 mm och till höger ändras den till 11.2 mm.

När minsta tillåtna partikelstorlek justeras ändras antalet partiklar per massenhet. I Tabell 2 visas antalet partiklar per massenhet för medelfördelningen samt för modifierade fördelningar där minsta partikelstorlek har ökat. Om en simulering görs där en miljon partiklar tillåts och en kvadratisk partikelbädd med höjd 20 cm ska skapas, kommer vald fördelning begränsa sidlängden på bädden. För referensfördelningen blir resulterande sidlängd endast 15 cm. Sidlängden ökar sedan när minsta tillåtna storlek höjs och för 16 mm blir sidlängden hela 6.22 m. Detta samband mellan minsta tillåtna storlek och sidlängd visas i Tabell 2. I beräkningarna har packningsdensitet antagits vara 0.7 och materialets densitet 2700 kg/m³.

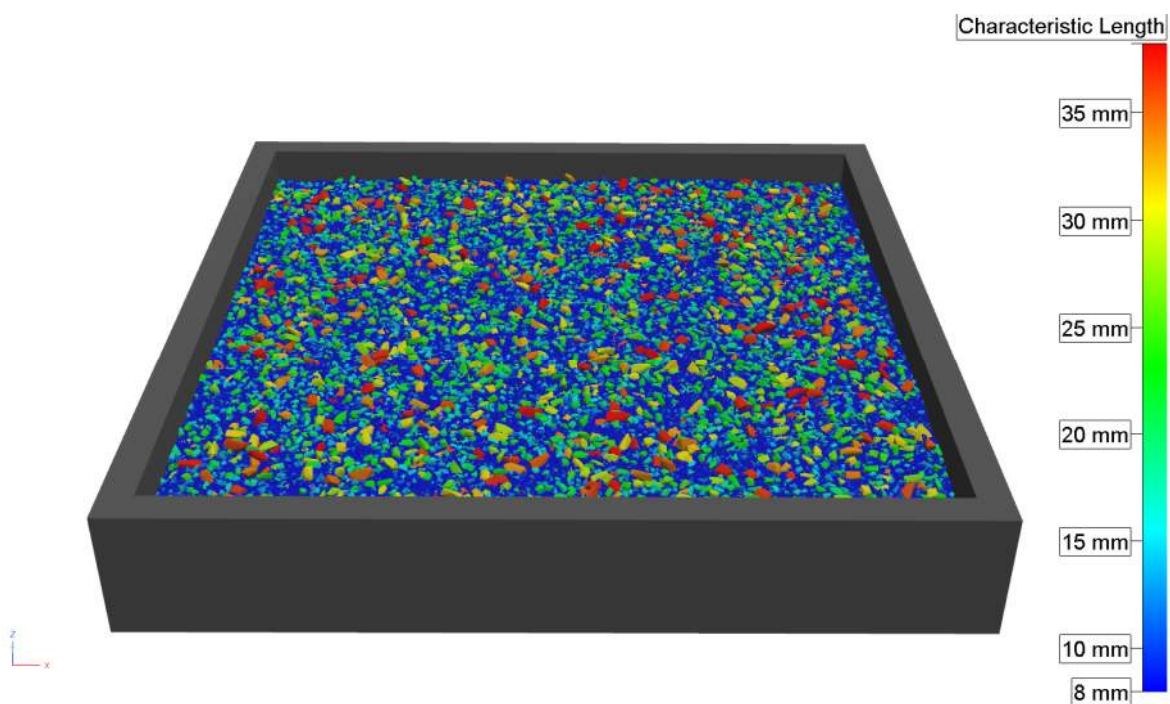
Tabell 2. För olika värden på minsta tillåtna partikelstorlek visas antalet partiklar per kilo. Dessutom visas sidlängden på en kvadratisk bädd fylld med en miljon partiklar från respektive fördelning. Bäddhöjden är 20 cm och bäddens packningsdensitet antas vara 0.7. Materialets densitet är 2700 kg/m³.

Minsta partikelstorlek [mm]	0.66	1	2	4	5.6	8	11.2	16
Antal partiklar per massa [# /kg]	110 955	31 224	11 674	2 057	1 339	504	186	68
Sidlängd för kvadratisk bädd [m]	0.15	0.29	0.48	1.13	1.40	2.29	3.78	6.22

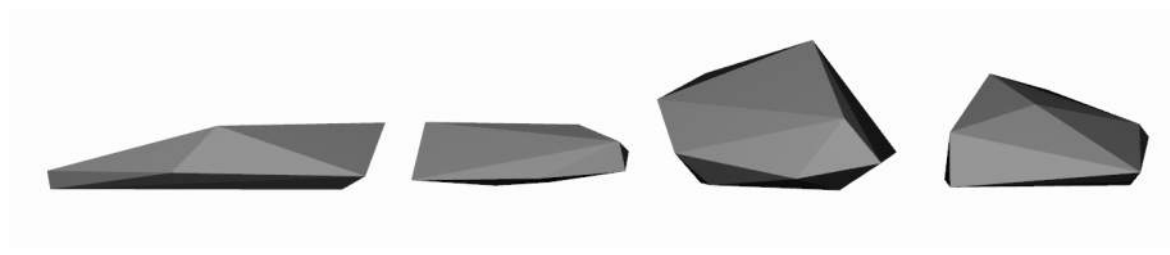
I Figur 11 ses en bädd skapad genom simulering med Demify. Bädden är skapad enligt beskrivningen ovan och storleksfördelningen har minsta storlek 8 mm och resulterande sidlängd är 2.29 m. Bädden har skapats genom att generera partiklar i en generatoromän (en box) placerad över bädden. Partiklar skapas genom att en storlek dras från fördelningen och sedan dras en slumpmässig form från ett antal förbestämda modeller som är trianguleringar av inskannade stenar (se Figur 12 för de olika modellerna). Partikelns position slumpas likformigt i domänen men kan ej placeras så

att den överlappar med redan existerande partiklar. Sker kollision slumpas en ny position. Efter ett visst antal misslyckade försök slängs partikeln och en ny generering påbörjas. Genererade partiklar faller med gravitation medan ytterligare partiklar genereras tills önskad mängd partiklar skapats. Resultatet i Figur 11 innehåller en miljon partiklar vilket i denna simulering krävde 13 GB minne på datorns GPU.

Två referensbeteckningar som kommer användas löpande är $D_{max} = 38$ mm (gräns för 100 % passerande korn) som representerar maximala storleken hos de partiklar som används, samt $m_{max} = 0.127$ kg som representeras massan hos de största partiklarna givet de modeller som används. Notera att för en oregelbunden partikel motsvarar D inte diametern hos den största sfär som omsluter partikeln utan näst största sidan hos den minsta möjliga box som omsluter partikeln. För en sfär motsvarar D_{max} dock diametern och massan ges då trivialt av sfärens volym gånger densiteten.



Figur 11. Partikelbädd skapad genom simulering i Demify. Minsta partikelstorlek är 8 mm, lådans sidlängd är 2.30 m och höjden 20 cm. Bädden innehåller en miljon partiklar.

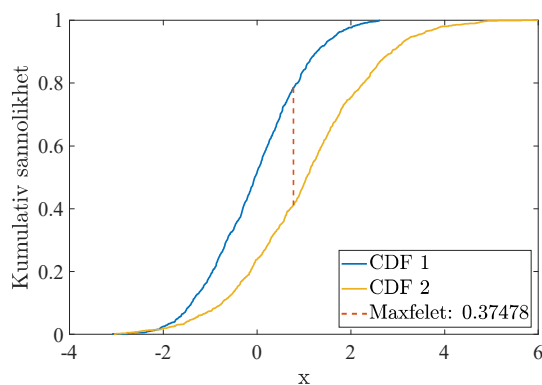


Figur 12. Fyra olika partikelmodeller i form av trianguleringar skapade från skanningar av riktiga stenar.

I detta arbetspaket analyseras hur avvikelser från en given storleksfördelning varierar över en bädd samt hur stor mängd material som behövs för att få en rimlig representation av underliggande fördelning. För att möjliggöra denna analys krävs mått på felet eller avvikelser mellan olika fördelningar. Två mått är

$$\max_x |F_1(x) - F_2(x)|, \quad \sqrt[k]{\int |F_1(x) - F_2(x)|^k dx}, \quad (1.2)$$

där $F_1(x)$ och $F_2(x)$ är de kumulativa fördelningsfunktionerna för de två storleksfördelningar som jämförs. Första felet är maxfelet och kallas också för Kolmogorov-Smirnovs statistika. Den används i Kolmogorov-Smirnovs test för att testa om en fördelning kan antas vara genererad av en referensfördelning. En illustration av maxfelet visas i Figur 13. Det andra felet är definierat för olika heltal k och till exempel för $k = 2$ benämns det L_2 -felet. För att få ett teckenfel kan absolutbeloppet utelämnas och för udda k fås en indikation på avvikelsernas riktning för två fördelningar.



Figur 13. Illustration av maxfelet mellan två fördelningar CDF 1 och CDF 2.

För att få en uppskattning om de olika felens storleksordning används de tre fördelningarna i Figur 8, innefattande medelfördelningen och övre och undre gränsfördelningarna. För de olika parvisa kombinationerna av dessa fördelningar beräknas max-felet, L_1 -felet, L_2 -felet, och L_1 teckenfel. De resulterande numeriska värdena visas i Tabell 3. Notera att för teckenfelen är ordningen på differensen mellan fördelningarna avgörande.

Tabell 3. För storleksfördelningarna i Figur 8 har olika fel beräknats parvis för medel-, max- och minfördelningen. De olika felen är maxfel, L1-fel, L2-fel samt L1 teckenfel (d.v.s. utan absolutbelopp i integralen).

Skillnad	Maxfel	L1-fel	L2-fel	L1 teckenfel
$F_{medel} - F_{min}$	0.14	4.65e-3	2.31e-2	4.63e-3
$F_{medel} - F_{max}$	0.24	3.68e-3	2.30e-2	1.08e-3
$F_{max} - F_{min}$	0.30	4.72e-3	2.77e-2	3.55e-3

Maxfelet mäts som största absoluta skillnaden mellan två kumulativa storleksfördelningar och dess värde är i intervallet [0, 1] där 0 motsvarar 0 procentenheter och 1 motsvarar 100 procentenheter. Som framgår av Tabell 3 och ses i Figur 8 är maxfelet mellan medelfördelningen och nedre gränsvärdesfördelningen 0.14 (14 procentenheter) och inträffar ungefär vid siktstorlek 16 mm. Maxfelet mellan medelfördelningen och övre gränsvärdesfördelningen är 0.24 (24 procentenheter) och inträffar vid siktstorlek 0.66 mm. Maxfelet mellan övre och undre gränsvärdesfördelningen är 0.30 (30 procentenheter) och inträffar ungefär vid siktstorlek 4 mm.

I praktiken, givet två gränsfördelningar, som till exempel i Figur 8, får ej materialets fördelning ligga utanför dessa. Beräknas medelfördelningen (horisontellt medelvärde) och används som referens för när maxfelet beräknas för ett provs fördelning blir det resulterande maxfelet den största skillnaden i y-led i grafen mellan medelfördelningen och provets fördelning. Så om maxfelet är mindre än den minsta vertikala skillnaden grafiskt mellan medelfördelningen och de båda gränsfördelningarna innebär det att provets fördelning ligger inom gränserna för vad som är tillåtet. Maxfelet är alltså ett användbart mått för att mäta avvikelser mellan ett provs fördelning och en referensfördelning.

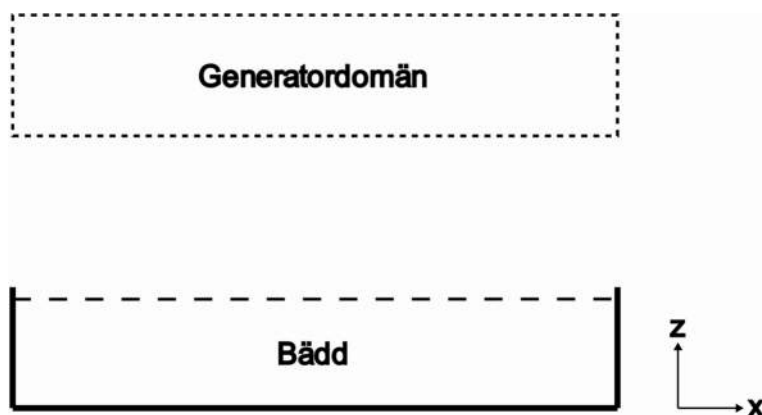
Bortses från siktstorlekar mindre än 1 mm (detta på grund av exkluderingen av partiklar mindre än 0.66 mm) så är minsta absoluta vertikala avvikelse mellan medelfördelningen och någon av gränsvärdesfördelningarna ungefär 0.03 och inträffar vid siktstorlek 1 mm mellan medel och undre gräns. Vidare är största möjliga absoluta vertikala avvikelse 0.2 och inträffar vid siktstorlek 4 mm mellan medel och övre gräns. Dessa två avvikelser, 0.03 och 0.2 är lämpliga att relatera till i bedömningen om en provfördelning är tillåten eller ej. Är maxfelet mellan prov och referensfördelning (medelfördelningen) mindre än 0.03 är det garanterat att provets fördelning ligger inom tillåtna gränser. Är det större än 0.2 är det garanterat att provets fördelning ligger utanför gränserna och därför är otillåtet.

Vidare finns det alltid en variation i en bädd även om bädden "teoretiskt" är skapad utan segregering så gott det går. Om ett prov dras slumpmässigt från en referensfördelning, likt att ta material från en låda innehållande material vilket exakt följer referensfördelning, så kommer det resulterande maxfelet mellan prov och referens med största sannolikhet vara nollskilt. Ju mindre provmängd, desto större medelmaxfel om flera prover tas. Detta innebär att även om ett prov ger ett maxfel

som gör att provets fördelning ligger utanför gränserna, betyder inte det nödvändigtvis att hela bäddens fördelning ligger utanför gränserna. Det kan i stället visa på att det uppstått en segregering där provet tas, men det kan också enbart bero på slump.

När partikelbäddar genereras genom simulering ges som indata en partikelfördelning och hur mycket partiklar som ska genereras. Partiklarna genereras sedan med jämna mellanrum definierade av en frekvens och i delmängder utifrån ett angivet massflöde. Partiklarna genereras i en generatoromän enligt Figur 14 och faller med gravitationen ner i bädden. Under arbetet med dessa simuleringar uppstod tre huvudsakliga problem:

- Problem 1 - generationsvolym
- Problem 2 - volymfraktion för generatoromän
- Problem 3 - randeffekter hos generatoromänen



Figur 14. 2d-illustration av hur partikelbädden genereras i simulering. Partiklarna genereras i delmängder givet en frekvens, placeras ut i generatoromänen, och faller sedan ner i bädden.

Problem 1 – generationsvolym: generationsvolymen betecknar den totala volym partiklar som kommer genereras. Avvikelsen från referensfördelningen som partiklarna slumpas från och den resulterade fördelningen hos de genererade partiklarna beror på generationsvolymen. Är generationsvolymen för liten kan avvikelsen från referensfördelningen vara stor redan i den genererade bädden. När ett prov skall tas från en bädd gäller samma princip, med ett för litet prov kan felet bli stort även om provytans avvikelse från referensfördelningen är liten.

Problem 2 - volymfraktion för generatoromän: som tidigare nämnts genereras partiklar i delmängder av den totala generationsvolymen baserat på en frekvens. Tas kvoten mellan en sådan delvolym och den totala volymen för generatoromänen fås en volymfraktion som beskriver hur trångt det blir i generatoromänen när partiklarna placeras ut. Denna volymfraktion behöver vara tillräckligt liten för att inte den resulterande fördelningen ska påverkas märkbart. Detta beror på att generatorm placeras ut partiklar slumpmässigt och om överlapp med redan utplacerad partikel sker så görs ett begränsat antal nya försök. Om alla dessa försök misslyckats genereras en ny partikel. Eftersom stora partiklar är svårare att få plats kommer därför resulterande

partikelfördelning innehålla fler små partiklar än referensfördelningen om volymfraktionen är för stor. Detta problem berör enbart simuleringar och har ingen motsvarighet i ett experiment.

Problem 3 - randeffekter hos generatordomänen: eftersom generatordomänen är begränsad påverkar domänens ränder genereringsprocessen. Partiklar placeras så att hela partikelgeometrin är inuti generatordomänen. Detta medför att stora partiklar inte kan placeras lika nära randen som mindre partiklar, sett till deras centerpunkt. Detta skapar en snedfördelning så att stora partiklar är överrepresenterade centralt, medan nära randen är små partiklar överrepresenterade. Denna problematik är viktig när fördelningsavvikelse mäts i simulerade bäddar men också relevant i praktiska fall där prover tas nära strukturer som väggar.

Ovanstående tre problem kommer diskuteras och analyseras i detalj i följande avsnitt.

Två olika verktyg kommer användas vid generering av partiklar: dels Demify:s generator, dels en så kallad prototypgenerator. Prototypgeneratoren slumpar enbart storlekar från en given storleksfördelning och registrerar den genererade storleksfördelningen utan att spara varje enskild partikel. Dessutom antas partiklarna vara sfärer med diameter enligt den slumpade storleken. Detta antagande används för att beräkna partikelns massa vilket används för den massbaserade storleksfördelningen. Fördelen med prototypgeneratoren är att den kan generera godtyckligt många partiklar och är därför användbar för generella studier. Demify:s generator använder sig av realistiska partikelformer (se Figur 12) vilket ger resultat som skiljer jämfört med sfärer eftersom massbaserade storleksfördelningar studeras i detta arbete.

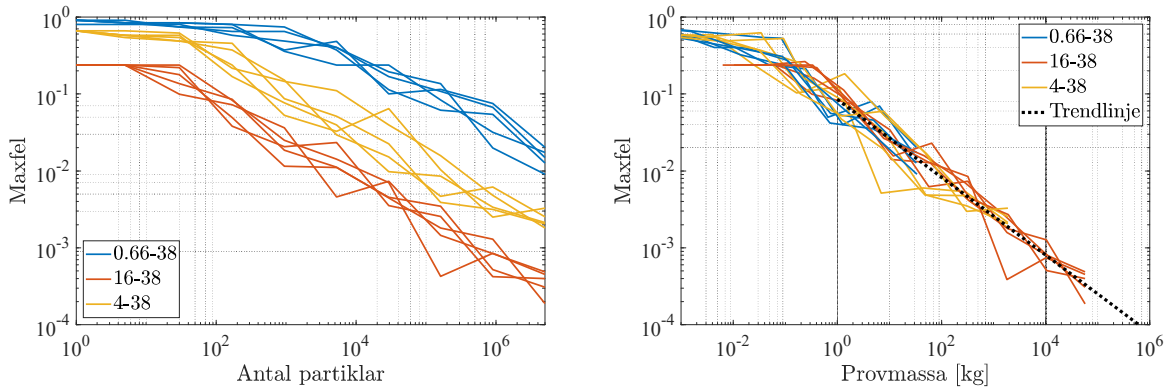
5.1 Problem 1 – generationsvolym (provmängd)

Generationsvolymen definieras som den totala mängd material som skapas. Ur ett simuleringsperspektiv motsvarar det volymen på det som ska genereras. Ur ett provtagningsperspektiv motsvarar det i stället hur stor mängd material som ingår i provet som extraheras. I detta avsnitt studeras hur avvikelsen i storleksfördelning mellan referensfördelningen och provet varierar för olika provmängder.

Först studeras tre referensfördelningar med största partikelstorlek 38 mm och minsta partikelstorlek 0.66 mm, 4 mm och 16 mm. För varje fall dras slumpmässiga storlekar från fördelningen med hjälp av prototypgeneratoren och felet mot referensfördelningen beräknas. Fem miljoner partiklar dras. Det görs fem repetitioner per fördelning. Resultatet visas i Figur 15. Två grafer visas med olika x-axel: en med antal partiklar och en med provmassan (baserat på en densitet på 2700 kg/m^3). Det krävs färre antal partiklar för att uppnå en viss felnivå ju mindre skillnad det är mellan minsta och största storleken i fördelningen. I högra grafen ses att när provmängden i stället mäts med massa så följer alla tre fall samma nedåtgående trend. Som framgår verkar felet minska enligt en potenslag med ökande provmängd. Utifrån den linjära utvecklingen för provmängd större än 1–10 maxpartiklar passas en linjär funktion till den logaritmiska grafens data vilket transformerat resulterar i följande potenslag

$$y = \frac{0.085}{\sqrt{x}} \quad (1.3)$$

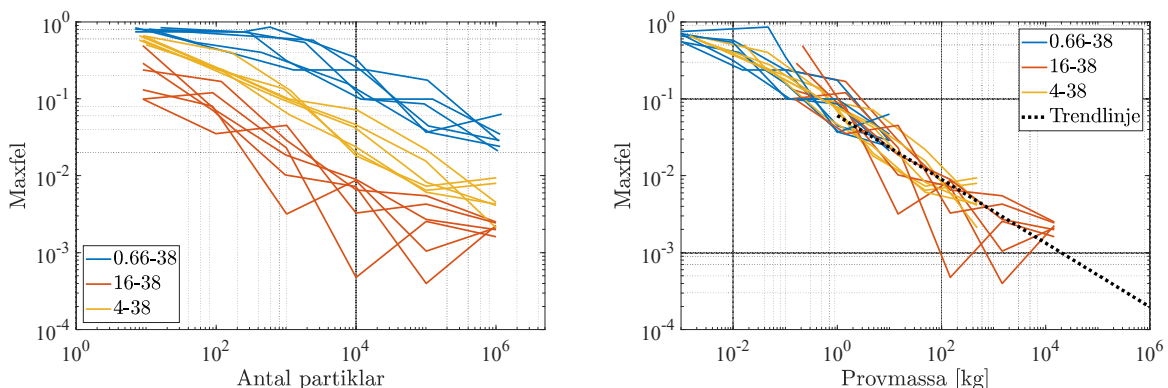
där y är maxfelet och x är provmängden mätt i kg. Detta gäller alltså för sfäriska partiklar med densitet 2700 kg/m^3 .



Figur 15. Graferna visar hur maxfelet mellan storleksfördelningen hos provet och referensfördelningen utvecklas när provmängden utökas. Till vänster visas antalet partiklar på x -axeln och till höger är det i stället provmängdens massa. I högra grafen är en linjär funktion i log-log-domänen anpassad till graferna vilket motsvarar ekvation (1.3).

Liknande studie som den ovan utförs också med Demify:s generator. Två viktiga skillnader mellan ovanstående studie och denna är att partikelmodellerna i Figur 12 används för att räkna ut partiklens massa, samt att om en slumpad partikel överlappar med en redan existerande partikel tjuo försök i rad så kastas den partikeln och en ny dras. Det senare bör ha minimal inverkan då generatordomänen som används är mycket stor. Resultande grafer för maxfelet ses i Figur 16. Resultande kurvanpassning ger följande relation mellan maxfel och provmängd [kg]

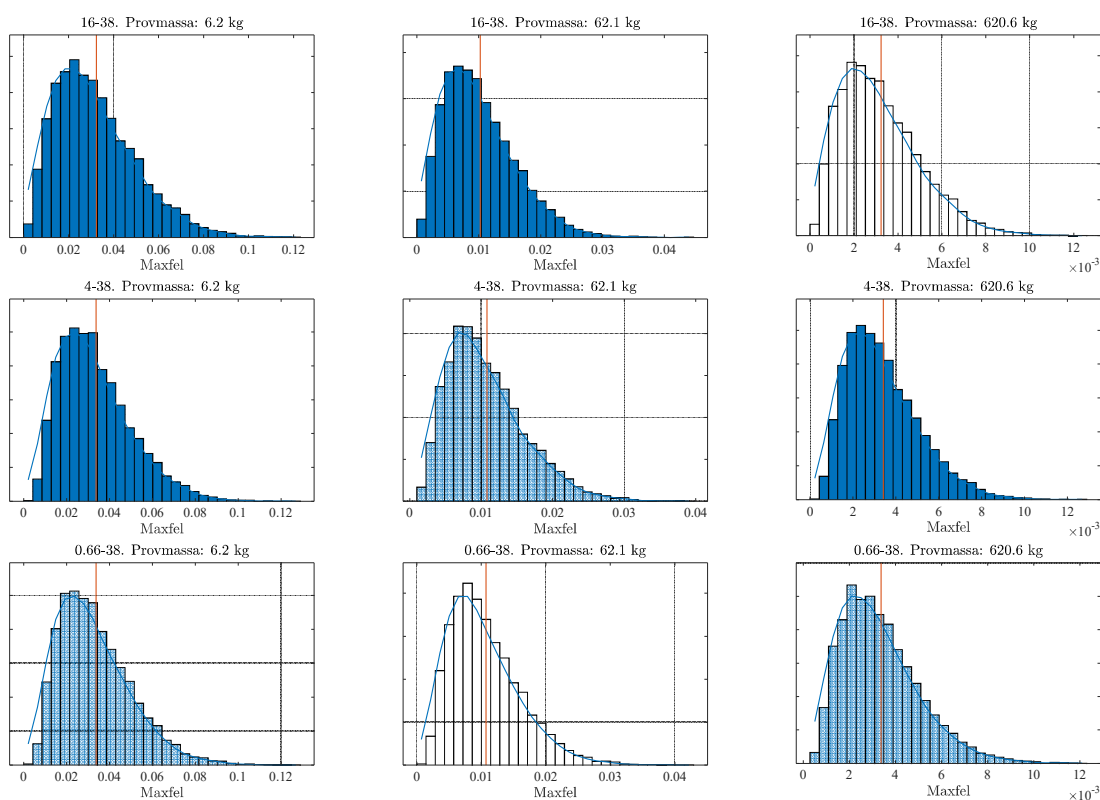
$$y = \frac{0.061}{x^{0.42}} \quad (1.4)$$



Figur 16. Graferna visar hur maxfelet mellan storleksfördelningen hos provet och referensfördelningen utvecklas när provmängden utökas vid generering med Demify. Till vänster visas antalet partiklar på x -axeln och till höger är provmängden normerad så att massan beskrivs i antal av största partiklens massa. I högra grafen är en linjär funktion i log-log-domänen anpassad till graferna vilket motsvarar ekvation (1.4).

Notera att partikelintervallets undre gräns inte påverkar sambandet mellan provmängd och maxfel. Dock har partiklarnas form en påverkan, vilket de två olika kurvanpassningarna för sfäriska respektive oregelbundna former visar. Hur maximal partikelstorlek påverkar sambandet har inte undersökts i detta arbete men bör undersökas framöver.

I en ytterligare studie studeras variansen av felet för ett prov från en referensfördelning. Detta visar hur maxfelet mellan prov och referensfördelning varierar statistiskt om ett prov dras från referensfördelningen många gånger. Studien utförs med prototypgeneratorn för att möjliggöra stort antal repetitioner. För samma tre fördelningar som i ovanstående analys dras prov med tre olika provmängder och maxfelet räknas ut. Detta upprepas tiotusen gånger för varje fall av de nio kombinationerna (3 fördelningar x 3 provmassor). Resulterande sannolikhetsfördelningar av maxfelen ses i Figur 17.



Figur 17. Maxfelets sannolikhetsfördelning för tre olika storleksfördelningar och tre olika provmängder. Medelfelet visas med röd vertikal linje. Totalt tiotusen prover togs för varje uppsättning av storleksfördelning och provmängd.

Studien visar att felfördelningarnas form följer en Kolmogorov-fördelning vilket är rimligt enligt Kolmogorov-Smirnovs fördelningsanalys. För given provmängd är felens storlek lika oavsett storleksintervall och medelfelet följer den kurvanpassade felekvationen (1.3), till exempel är $\frac{0.085}{\sqrt{6.2}} = 0.034$. Vidare ses att felens storlek sjunker med ökad provmängd. Dessa resultat kan användas för att förbättra processen vid provtagning. I praktiken kan detta jämföras med att ta prov från en osegregerad bädd

som har korrekt referensfördelning. Enligt TDOK 2014:0151 så bör ett prov på 20–30 kg tas för material med liknande storleksfördelning. Enligt ekvation (1.3) blir medelmaxfelet mellan $\frac{0.085}{\sqrt{20}} = 0.019$ och $\frac{0.085}{\sqrt{30}} = 0.015$ för provmängder mellan 20 och 30 kg. En riktlinje är att ungefär 5 % av proverna har ett maxfel som är större än dubbla medelfelet. Detta ger att för 30 kg får 5 % av proverna ett maxfel över 0.03 vilket var minsta absoluta avvikelser mellan medelfördelningen och gränsfördelningen (se Figur 8). Alltså kommer 95 % av proverna garanterat vara inom gränserna om proverna kommer från medelfördelningen.

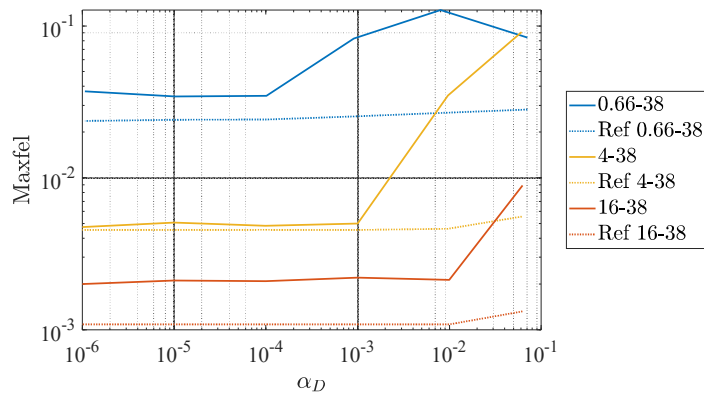
5.2 Problem 2 – volymfraktion för generatordomän

Låt V_D beteckna volymen hos generatordomänen (se Figur 14), det vill säga volymen av det tredimensionella område vari partiklar placeras efter att de slumpats fram från en given referensfördelning. Låt V_G beteckna totala volymen hos de partiklar som ska placeras ut i domänen. Definiera vidare genereringens volymfraktion enligt

$$\alpha_D = \frac{V_G}{V_D} \quad (1.5)$$

Denna volymfraktion beskriver hur stor andel av domänen som partiklarna täcker om de placeras ut utan överlapp. Som tidigare beskrivits så slumpas partiklar ut i domänen och kontrolleras om överlapp med redan utplacerade partiklar uppstår. Sker överlapp slumpas en ny position och ett nytt försök görs, men endast ett begränsat antal gånger. Till slut kastas partikeln och en ny genereras. Höga volymfraktioner leder till att för få stora partiklar genereras sett till referensfördelningen. Alternativt kan konsekvensen även bli att den efterfrågade generationsvolymen, V_G , inte uppnås.

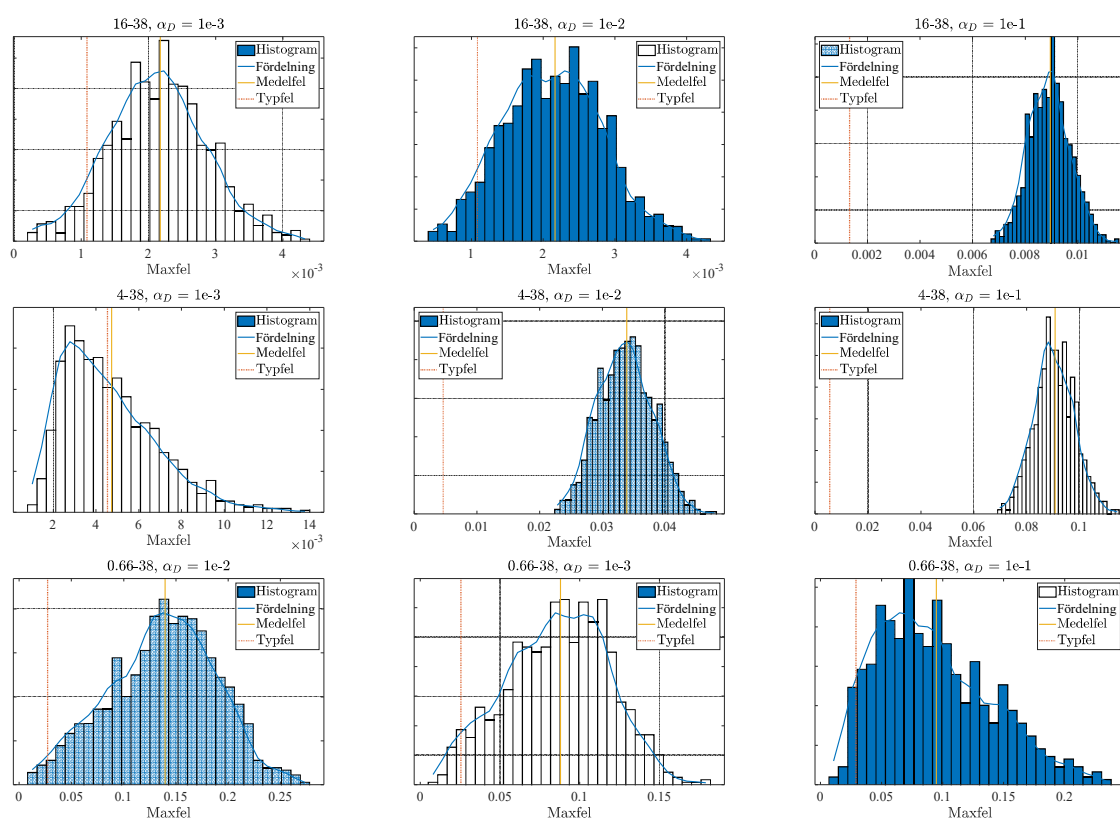
En inledande simuleringsstudie gjordes där Demify genererade en miljon partiklar. Detta gjordes för tre olika storleksfördelningar enligt tidigare avsnitt (0.66–38 mm, 4–38 mm, 16–38 mm) och för sex volymfraktioner. För varje kombination av storleksfördelning och volymfraktion gjordes fem körningar. Maxfelet beräknades mellan resulterande partikelmateriel och referensfördelningen och medelmaxfelet över de fem körningarna extraherades. Se Figur 18 för det resulterande medelmaxfelets beroende av volymfraktionen. I graferna är också felet inkluderat för vad maxfelet är i genomsnitt för den givna generationsvolymen enligt ekvation (1.4).



Figur 18. För tre olika storleksfördelningar genererades en miljon partiklar med olika generationsvolymfraktion. Maxfelet mellan resulterande fördelning och referensfördelningen beräknades. Detta upprepades tjugo gånger för varje volymfraktion. Medelvärden för maxfelen plottas mot volymfraktionen. För varje fall beräknades också referensfelet enligt ekvation (1.4).

I resultatet ses en viss avvikelse mellan maxmedelfelen och uppskattat fel enligt ekvation (1.4). Detta kan dock vara inom felmarginalen. Vidare ses att det finns en gräns för varje storleksintervall där ökande volymfraktion ger ökande maxfel. Det är vid denna gräns som generatordomänen blir för trång i relation till generationsvolymen så att partikelfördelningen påverkas av att generatoren inte lyckas placera ut vissa partiklar. Denna gräns infaller tidigare ju lägre minsta partikelstorlek som intervallet innehåller. Detta beror på att fler små partiklar har placerats ut och gör det svårt för stora att placeras ut.

För att studera maxfelets variation studeras åter igen tre storleksfördelningar (0.66–38 mm, 4–38 mm, 16–38 mm) och tre volymfraktioner $\alpha_D \in \{10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}\}$. För varje fall av de nio kombinationerna genereras en miljon partiklar med Demify. Detta repeteras tusen gånger för varje kombination. De resulterande maxfelens fördelning visas i Figur 19. Medelfelet av de tusen repetitionerna samt typfelet enligt ekvation (1.4), för given provmängd är också utmarkerade i graferna.



Figur 19. Fördelningen av maxfelen för tusen repetitioner där en miljon partiklar genereras med Demify för olika kombinationer av storleksfördelning och volymfraktion. Medelfelet är medelvärde av alla tusen repetitioner. Typfelet är felet för motsvarande generationsvolym enligt (1.4).

Resultaten visar att när volymfraktionen är för stor, så att partikelkollision vid generering spelar roll, skapas en statistisk felfördelning som inte längre följer Kolmogorov-fördelningen. Notera att för 4–38 mm och $\alpha_D = 10^{-3}$ verkar trängseffekten vara försumbar och då sammanfaller medelfel och typfel och fördelningen får liknande form som Kolmogorov-fördelningen. Dock blir resultatet inte liknande för 16–38 mm vid samma volymfraktion vilket väcker fundering. Huruvida detta är relaterat till Demifys generator, något statistiskt fenomen eller annan felkälla behöver efterforskas men ryms inte i detta arbete.

5.3 Problem 3 – randeffekter hos generatordomänen

När partikelmaterial gränsar till strukturer såsom kanter och väggar kommer partikelfördelningen i lokala områden påverkas av strukturerna. Exempelvis är det inte möjligt att placera större partiklar (sett utifrån deras centerpunkt) lika nära väggar som mindre partiklar. Detta fenomen benämns som randeffekter och studeras närmare i detta avsnitt.

Beakta ett förenklat modellproblem. Sfärer ska placeras ut slumpmässigt i ett plant område begränsat av en cirkel, se Figur 20. Sfärerna tillåts ej överlappa cirkelns rand men överlapp mellan sfärer är tillåtet. Om sfärer genereras från en referensfördelning och placeras ut likformigt i cirkeln baserat på kravet om inga randöverlapp, hur kommer storleksfördelning på delmängder av cirkeln avvika från referensfördelningen?

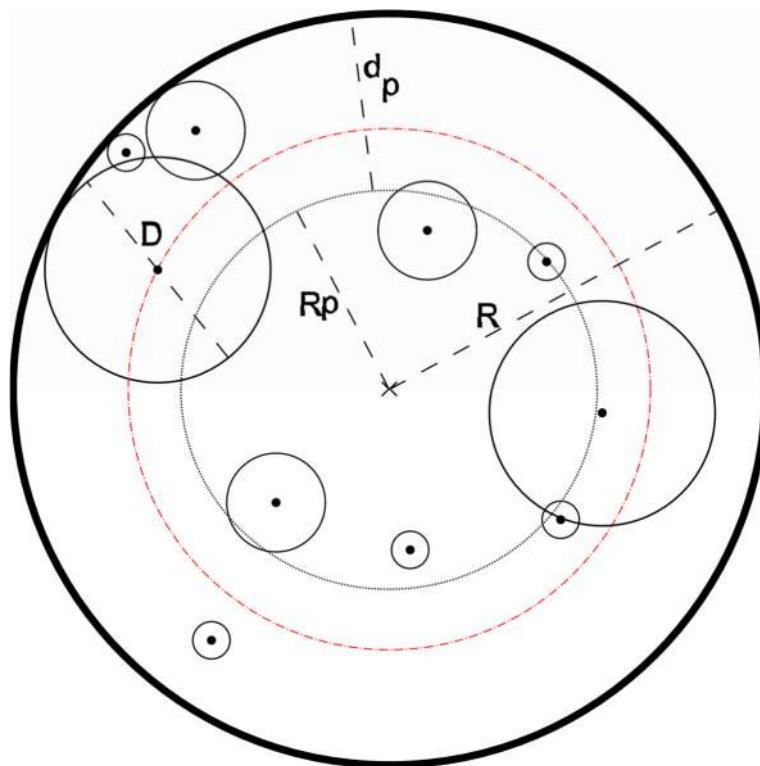
Notera att slumpmässig utplacering i en cirkel åstadkoms genom att partikelns avstånd d till cirkelns mittpunkt beräknas som

$$d = \sqrt{u}R_s \quad (1.6)$$

där u slumpas likformigt mellan 0 och 1, och den modifierade radien säkerställer att sfären inte överlappar randen och beräknas

$$R_s = R - \frac{s}{2} \quad (1.7)$$

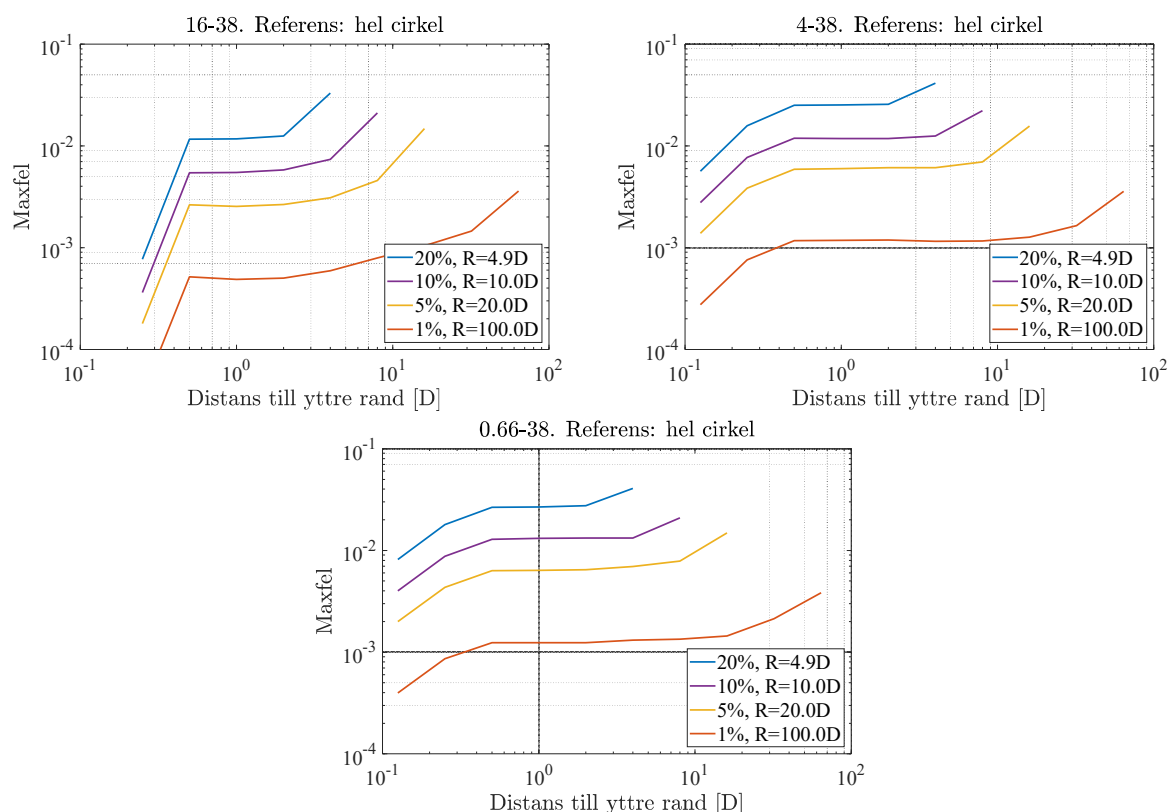
där R är cirkelns radie och s är sfärens diameter. Den polära koordinatens vinkel är inte relevant i denna studie då överlapp mellan sfärer ignoreras.



Figur 20. Tvådimensionell vy av en cirkel i ett plan där sfärer placeras utan att överlappa cirkelns rand. Sfärens mittpunkter är utmarkerade med prickar. Domäncirkelns mittpunkt är utmarkerad med ett kryss. Den största sfären representerar den största möjliga storleken i storleksfördelningen, betecknad D . Den röda punkt-streckade cirkeln har ett avstånd till randen som är lika stort som den största sfärens radie. Alltså kan alla sfärens centerpunkter placeras innanför den streckade linjen men utanför kan bara mindre och mindre partiklars centerpunkter placeras. Området innanför den rödstreckade cirkeln kallas randreducerad domän och beror på största partikelstorlek. En provcirkel är exemplifierad med punktad linje och dess radie betecknas $R_p = R - d_p$ där d_p är avstånden från provcirkelns rand till domänens rand, se utmarkering.

En studie görs genom att, för en cirkel med radie R , slumpa en mängd sfärer med kravet att ej överlappa cirkelns rand (dock är överlapp mellan sfärer tillåtet). Därefter tas olika provmängder och deras storleksfördelning jämförs med storleksfördelningen

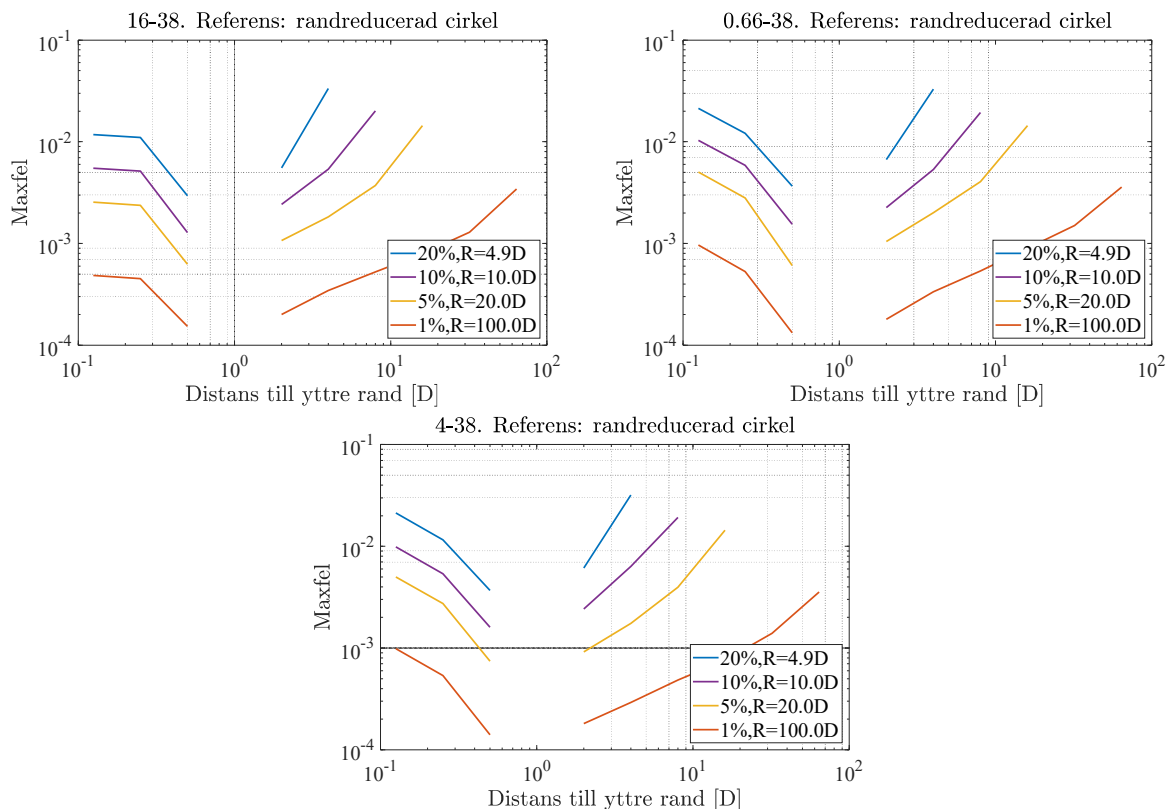
för alla utplacerade sfärer. Provmängden väljs som alla sfärer vars centerpunkt är i en provcirkel centrerad i domäncirkelns center och med olika provradier $R_p = R - d_p$ där d_p är distansen från provcirkelns rand till domäncirkelns rand. Notera att det är sfärernas centerpunkt som avgör om de är i provcirkeln eller ej. Fyra olika storlekar på domäncirkeln testas. De resulterande maxfelen ses i Figur 21. De fyra olika storlekarna väljs så att arean i den yttre domänen, det vill säga skillnaden mellan hela domänen och den randreducerade domänen, är en procentsats av totala arean, i denna studie väljs, 1 %, 5 %, 10 % och 20 %. I samtliga fyra fall genereras en total mängd sfärer så att den proportionella mängden i yttre domänen ska motsvara femhundra maxpartiklar.



Figur 21. Kurvorna visar hur maxfelet beror på provcirkelns storlek. Maxfelet beräknas mellan storleksfördelningen för alla sfärer i en cirkulär domän och delmängden av sfärerna i provcirkeln. Provcirkelns radie väljs som $R_p = R - d_p$ där R är domänens radie och d_p är avståndet från provcirkelns rand till domänens rand, se Figur 20. Notera att för $d_p = 0$ är felet noll.

Graferna visar att felet är noll när provytan är lika med hela domänen och sedan ökar felet snabbt upp till provcirkeln blir lika stor som den randreducerade domänen, det vill säga, då området börjar där alla sfärer kan placeras. Sen är felet relativt stabilt till provcirkelns storlek börjar bli så små att felet relaterat till för liten provmängd börjar spela in.

För samma studie som ovan görs en ytterligare jämförelse för alla provmängder. I stället för att räkna maxfelet mot alla sfärer i domänen jämförs i stället med alla sfärer i den randreducerade domänen. Resultande maxfel ses i Figur 22.

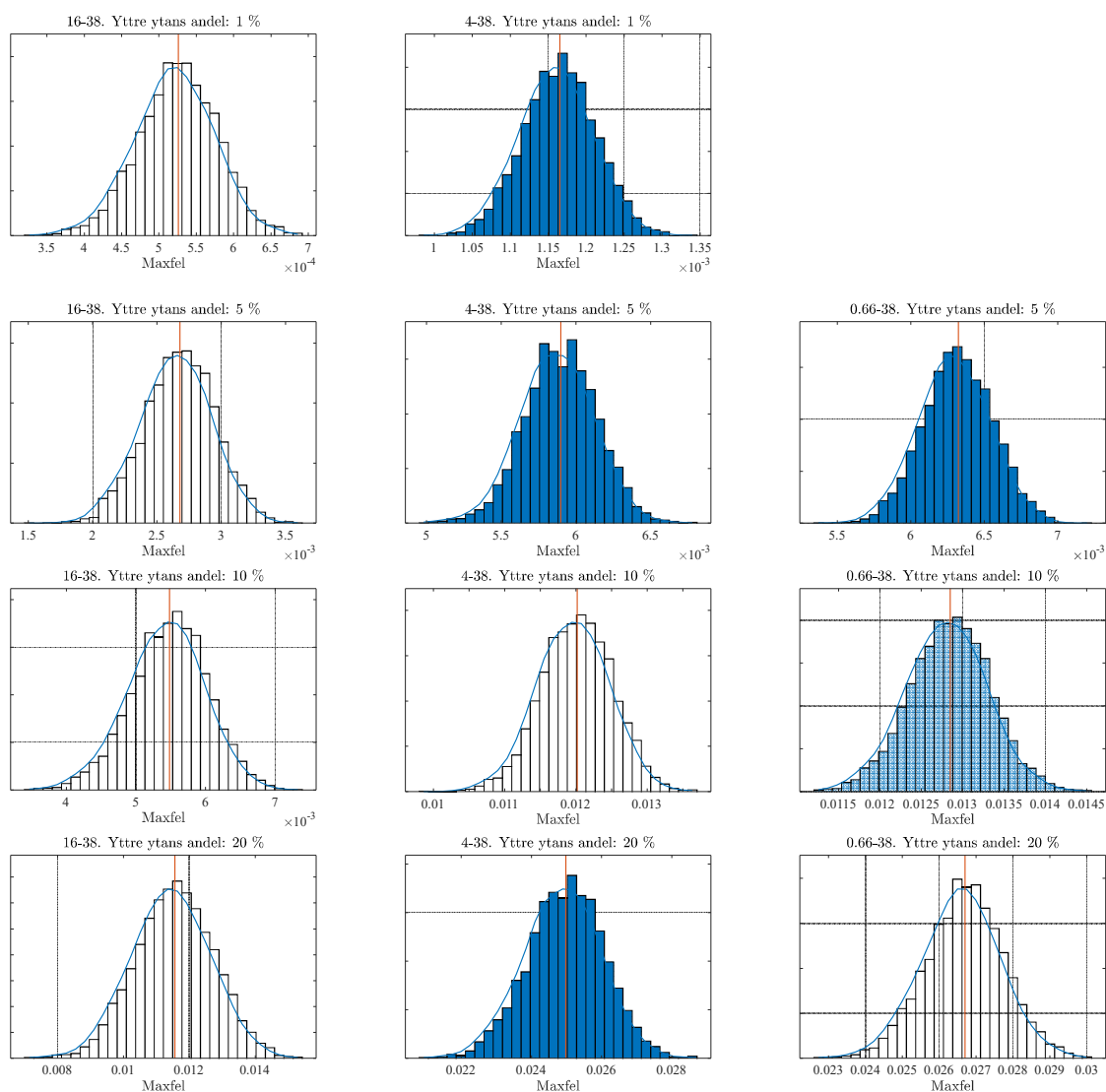


Figur 22. Kurvorna visar hur maxfelet beror på provcirkelns storlek. Maxfelet beräknas mellan storleksfördelningen för sfärerna i den randreducerade cirkeln och sfärerna i provcirkeln. Provcirkelns radie väljs som $R_p = R - d_p$ där R är domänens radie och d_p är avståndet från provcirkelns rand till domänens rand, se Figur 20. Notera att för $d_p = D$ är felet noll.

Dessa resultat visar att nollfelet uppstår då provcirkeln sammanfaller med den randreducerade domänen. När provcirkeln växer utanför den randreducerade domänen stiger felet på grund av att fler och fler, och mindre och mindre partiklar inkluderas i förhållande till den randreducerade domänens referensfördelning. När provcirkeln däremot minskas så ökar också felet, detta på grund av att provmängden minskar och då ökar felet enligt Kolmogorov-Smirnovs teori. Notera att i Figur 22 var felet i stort sett konstant i en region medan det här ökar hela vägen. Detta beror på att i Figur 21 jämfördes provmängder tagna från en viss fördelning med en referensfördelning som var en annan. I Figur 22 tas prover från samma fördelning som avvikelserna beräknas mot.

Om prov ska tas i en domän där fördelningen påverkas av ränder är ett alternativ att jämföra provmängderna med fördelningen i den randreducerade domänen. Detta kommer göras i simuleringarna i nästa avsnitt. Då kommer det uppstå en avvikelse mellan studerad fördelning och den fördelning som användes för att generera partiklarna. För att få en uppskattning om hur mycket avvikelserna är mellan fördelningen i hela domänen och i den randreducerade domänen görs en studie med kombinationer av tre olika referensfördelningar och fyra olika domänstorlekar. För varje av de

resulterade tolv kombinationerna genereras partiklar och maxfelet mellan fördelningen i hela domänen och i den randreducerade domänen beräknas. Detta upprepas femtusen gånger per kombination. Mängden partiklar bestäms så att det i genomsnitt ska genereras en massa på femhundra gånger största partikelmassan i den yttre domänen. Resulterade fördelningar av maxfelen ses i Figur 23.

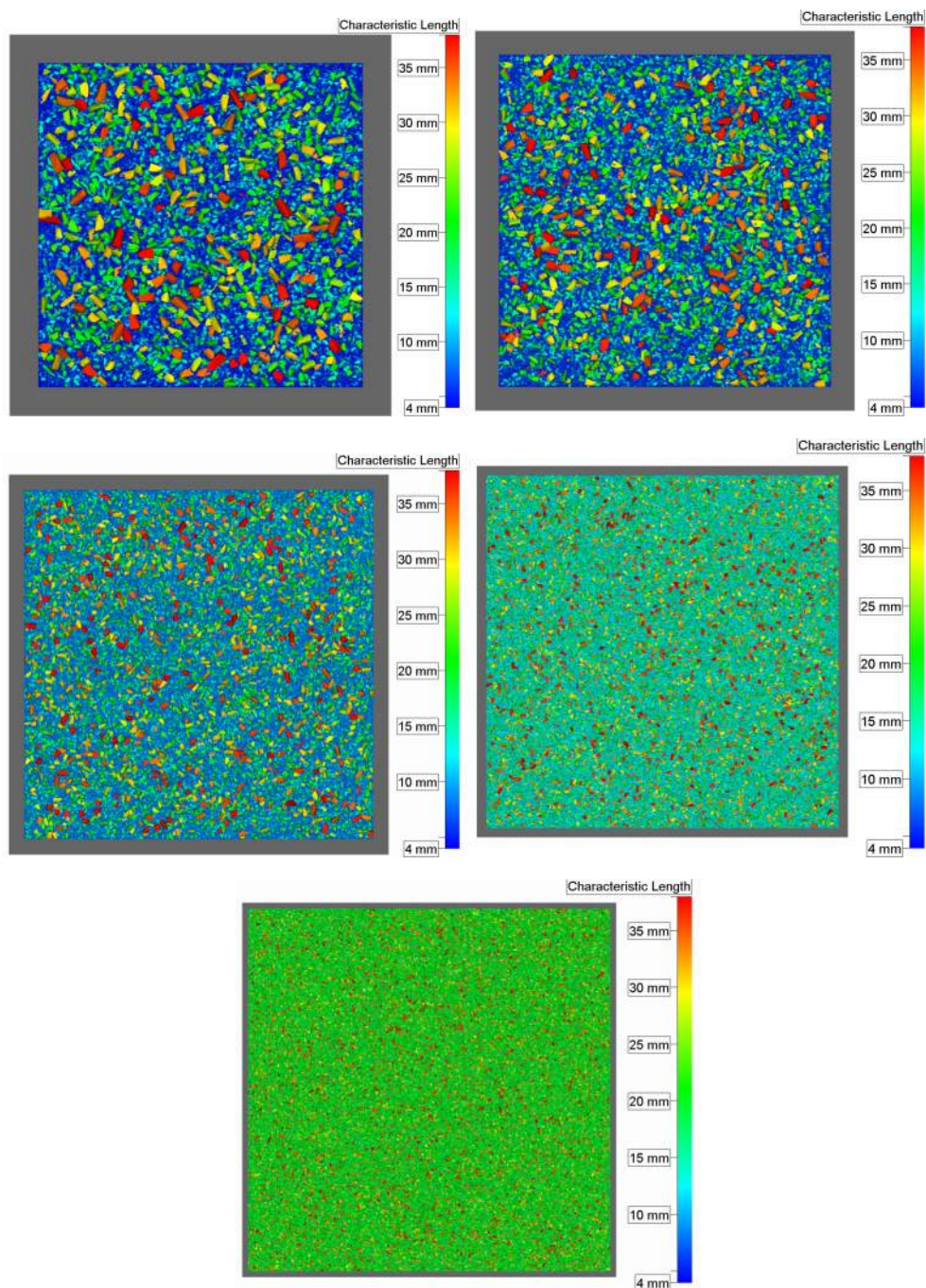


Figur 23. Sfärer genereras i en cirkel för olika referensfördelning och cirkelstorlekar. Detta upprepas femtusen gånger för varje av de tolv kombinationerna (tre fördelningar och fyra domänstorlekar). Maxfelet mellan alla genererade sfärer och alla sfärer med centerpunkt i den randreducerade domänen beräknas. Resulterade fördelningar visas. Medelfelet visas med vertikal röd linje.

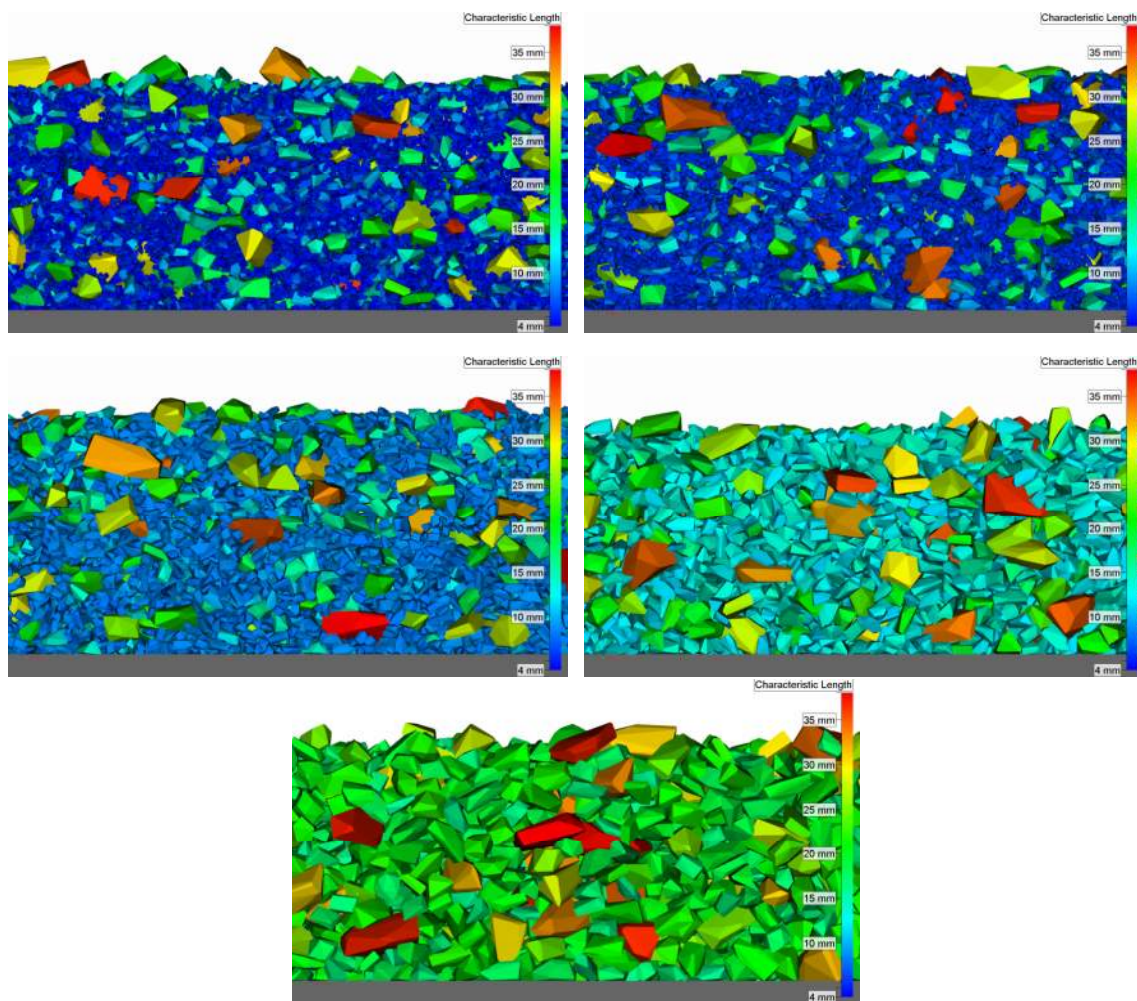
Resultaten visar exempelvis att om randzonen utgör 20 % av totala domänens areal blir medelmaxfelet mellan referensfördelningen och den randreducerade zonen ungefär 0.025. För 10 % randyta blir motsvarande medelmaxfel 0.012.

5.4 Referensbäddar

Som avslutning på kapitlet om studie av ideala referensbäddar används nu de lärdomar som beskrivits ovan för att studera variationen i storleksfördelning över en idealt skapad bädd. Att bädden skapats idealt innebär att partiklar likformigt slumpats ut i en generatoromän över bädden och partiklarna faller sedan med gravitation, så kallad generering via regning. Detta simuleras med hjälp av Demify för fem olika storleksfördelningar och totalt en miljon partiklar genereras. De fem storleksfördelningarna är 4–38 mm, 5.6–38 mm, 8–38 mm, 11.2–38 mm och 16–38 mm. De resulterande bäddarna ses ovanifrån i Figur 24. Tvärsnitt av bäddarna ses i Figur 25.



Figur 24. Vy från ovan på simulerade bäddar med olika sidlängd och partikelstorleksintervall. Intervallen är i ordning från högst upp till vänster till längst ner till höger följande: 4–38, 5.6–38, 8–38, 11.2–38 och 16–38 mm. Bäddarnas innermått är 1.1, 1.4, 2.3, 3.8, och 6.2 meter. Bäddarnas tjocklek är ungefär 20 cm. Notera att bilderna inte är inbördes skalenliga.



Figur 25. Tvärsnitt av simulerade bäddar som visas i Figur 24. Partikelstorleksintervallen är i ordning från högst upp till vänster till längst ner enligt följande: 4–38, 5.6–38, 8–38, 11.2–38 och 16–38 mm.

De simulerade bäddarnas karaktäristik beräknades genom att dela upp bäddarna i ett kvadratisk nät där varje cells storlek är ungefär 20 cm x 20 cm. I varje cell beräknades fem mått: ytvikt [kg/m²], graderingstal, storleksmått, maxfel och volymmedianavvikelse. Nätindelningen gjordes på den randreducerade domänen, det vill säga efter att en yttre remsa med bredd 0.5D exkluderats.

Graderingstal och storleksmått användes för att kvantifiera de experimentella resultaten i tidigare SBUF-projekt [4]. Graderingstalet C_u definieras enligt

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1.8)$$

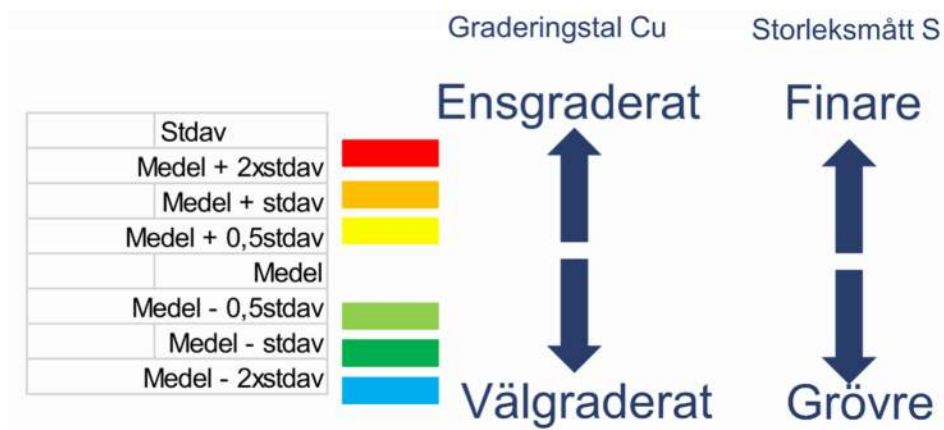
där d_x är den maskvidd för vilken x vikt-% av materialet är mindre. Ett högt värde visar på att materialet är välgraderat, vilket betyder att materialet innehåller många olika kornstorlekar och ett lågt värde att materialet är ensgraderat.

För att ge en indikation på om ett material är grovkornigare eller finkornigare används storleksmättet S vilket definieras

$$S = y_{31.5} + y_{16} + y_8 + y_4 + y_2 + y_1 + y_{0.5} + y_{0.25} + y_{0.125} + y_{0.063} \quad (1.9)$$

där y_x är den vikt-% passerat material genom siktplan med maskstorlek x mm. Ett högt storleksmått S innebär att materialet är finkornigare än för material med lågt storleksmått. I detta arbete visualiserar graderingstal och storleksmått i relativa termer med hjälp av medelvärde och standardavvikelse enligt föreskriven färgskala i Figur 26.

För varje enskild bädd eller provyta görs flera provtagningar och utifrån dessa beräknas medelvärde och standardavvikelse som används för att definiera den relativa mätskalan för graderingstal och storleksmått. Viktigt att notera är alltså att dessa två mått är normerade med given provytas egenskaper vilket behöver hållas i åtanke när diagram över graderingstal och storleksmått i detta arbete jämförs med varandra. Exempelvis är ett cellvärde med röd färg i ett diagram nödvändigtvis inte samma som ett cellvärde med röd färg i ett annat diagram. Dock är båda värden minst två standardavvikelser ifrån medelvärdet för alla celler i respektive bädd.



Figur 26. Beskrivning av hur graderingstalet och storleksmättet mäts relativt till en provtagnings medelvärde och standardavvikelse [4].

Slutligen definieras volymmedianavvikelsen enligt följande. Volymbaserade storleksmedianen d_m för en mängd partiklar definieras enligt

$$d_m = \left\{ \min_i d_i : \sum_{j=1}^i m_j > 0.5M \right\} \quad (1.10)$$

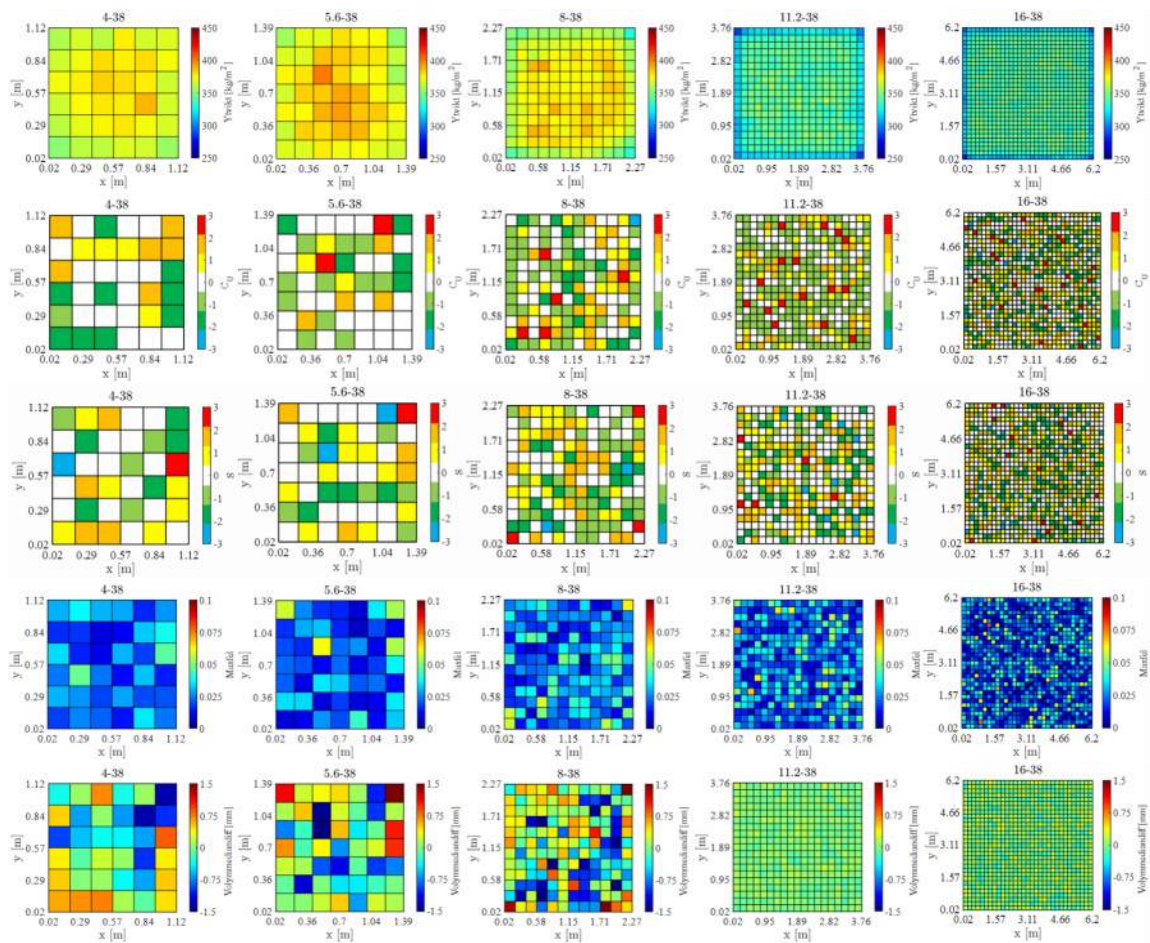
där d_j är storleken för partikel j , m_j är massan för partikel j och M är totala massan av alla partiklar. Dessutom är partiklarna sorterade så att $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n$ där n är totala antalet partiklar. Detta innebär att storleksmedianen är storleken för den partikel för vilken hälften av materialets massa har mindre storlek och hälften av materialets massa har större storlek. Volymmedianavvikelsen för ett materialprov definieras

$$d_m^{ref} - d_m \quad (1.11)$$

där d_m^{ref} är storleksmedianen för referensfördelningen och d_m är storleksmedianen för provet. Ett positivt värde på volymmedianavvikelsen indikerar att provet har större mängd finare partiklar än referensfördelningen och ett negativt värde indikerar tvärt om.

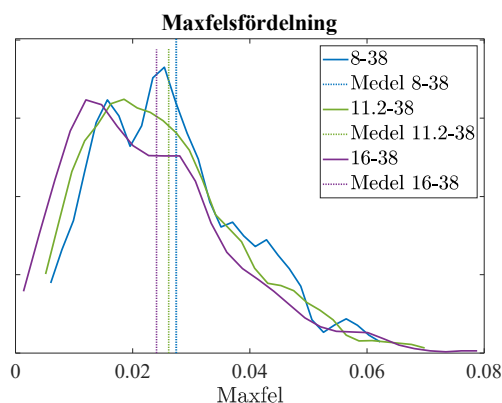
I Figur 27 visas karaktäristiken för simuleringsresultatet av de fem ideala referensbäddarna. Ytvikt, graderingstal, storleksmått, maxfel och volymmedianavvikelse visas för varje bädd. I varje fall har bädden genererats från en given referensfördelning, till exempel 5.6–38 mm. När egenskaperna för varje cell beräknas utgår kalkylen inte från referensfördelningen, utan från den resulterande fördelningen i den randreducerade bädden. Detta är viktigt att vara införstådd i. Avvikelsen är alltså inte från referensfördelningen utan från storleksfördelningen för alla partiklar i den randreducerade zonen.

Resultaten för referensbäddarna som visas här är lämpliga att gå tillbaka till för att jämföra med när resultat för mer avancerade bäddar i Kapitel DEM-simulering av utläggningsscenario 6 analyseras. Notera återigen att för graderingstalet och storleksmåtten är till exempel en röd färg i två olika diagram inte nödvändigtvis lika stor absolut avvikelse från medelvärdet, utan normerad. För referensbäddarna är standardavvikelsen mindre än för resultatet i Kapitel 6 DEM-simulering av utläggningsscenario.



Figur 27. Karaktäristik för de fem olika ideala bäddarna. Varje kolumn representerar en bädd, där skillnaderna mellan kolumnerna utgörs av olika storleksfördelningar: 4–38 mm, 5.6–38 mm, 8–38 mm, 11.2–38 mm, och 16–38 mm. Varje rad representerar en karaktäristik i följande ordning uppifrån: ytvtikt, graderingstal, storleksmått, maxfel och volymmedianavvikelse. Varje cell motsvarar ungefär 20 cm x 20 cm.

För bäddarna i Figur 27 är varje cells storlek ungefär 20 cm x 20 cm, vilket uppskattat motsvarar en provmängd på 15 kg (baserat på packningsdensitet 0.7 och materialdensitet 2700 kg/m³). Det ger enligt ekvation (1.4) ett förväntat medelmaxfel på 0.02. I Figur 28 visas maxfelsfördelningen för de tre största bäddarna (8–38 mm, 11.2–38 mm, 16–38 mm). Fördelningskurvorna har form liknande Kolmogorov-fördelningen. De två minsta bäddarna har för lite celler för att ge en tillräckligt representativ fördelningsfunktion och har därför utelämnats i diagrammet. Ju större bädd, desto fler celler och därmed bättre representation av medelfelets fördelning. Eftersom den randreducerade domänen inte får en referensfördelning som är samma som fördelningarna som ekvation (1.4) är anpassad efter kan inte värdena jämföras med denna ekvation rakt av. Det är därför medelfelet i Figur 28 är något högre än 0.02.



Figur 28. Maxfelsfördelning för de tre största bäddarna i Figur 27. Medelfel är utmarkerade med vertikala streckade linjer.

Resultaten för 16-38 mm i Figur 28 ger att för en provmängd på ungefär 15 kg är medelmaxfelet 0.024, 25 % av proverna har ett maxfel över 0.032, 10 % av proverna har ett maxfel över 0.043 och 5 % av proverna har ett maxfel över 0.050. På liknande sätt fås för resultatet i Figur 17 som har ett betydligt större provantal (tiotusen) men gjorde på samma fördelningar men med sfärformade partiklar att för 0.66-38 mm och en provmängd på 6.2 kg fås medelmaxfelet 0.034, 25 % av proverna har ett maxfel över 0.043, 10 % av proverna har ett maxfel över 0.057, och 5 % av proverna har ett maxfel över 0.066. Det framgår att det ungefär är en faktor två skillnad mellan medelmaxfelet och maxfelet som 5 % av proverna överstiger. Detta är användbart praktiskt. För en given provmassa kan förväntat medelmaxfel beräknas med ekvation (1.4), sedan kan detta fel dubbleras för att få en uppskattning om hur stort felet blir för de 5 % av proverna med störst maxfel.

6 DEM-simulering av utläggningsscenario

I detta arbetspaket används DEM för att simulera utläggning och utdragning av provytor. Insikterna från Kapitel 5 används för att mäta avvikelser i storleksfördelning. Två huvudstudier genomförs. I en studie skapas partikelhögar som sedan dras ut för att skapa en kvadratisk provyta. Högarna skapas genom regning och högarna dras ut med hjälp av ett rätblock. I andra studien används en skopa som fylls med partiklar. Materialet hålls sedan ut i en hög och slutligen dras högen ut med hjälp av en skopa. Studie två utförs i en avgränsad beräkningsdomän i form av en kanal.

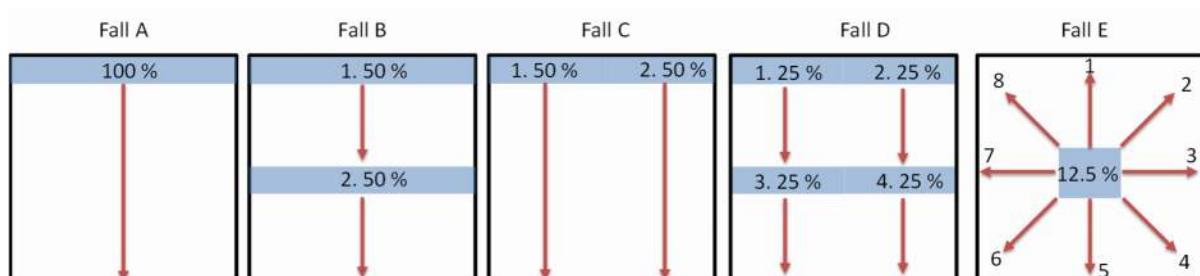
Angående skapandet av materialhögar bör skillnaden mellan regning och uthållning från skopa beaktas. Regning används för att skapa materialet i skopan innan det hålls ut. Så för studien där uthållning med skopa används sker ytterligare en process där segregering kan ske i jämförelse när högen direkt skapas med regning. Även regning har segregeringseffekter på högbildning sker och partiklar rullar ner längs med högens slutningar.

6.1 Utbredning av kvadratisk provyta

I detta avsnitt beskrivs en simuleringsstudie där kvadratiska provytor skapas genom att med ett rätblock dra ut partikelhögar som skapats genom regning. Studien är ämnad att efterlikna de experiment som gjorts i tidigare projekt men förenklad på så sätt att ideala högar skapas genom regning och att ett rätblock används för utdragning i stället för en skopa. Påverkan av uthållning från skopa och utdragning med skopa studeras i nästföljande avsnitt. Följande procedur genomförs för varje simulering:

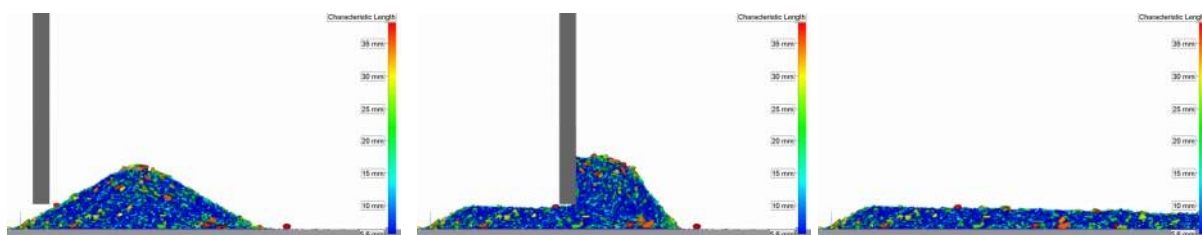
1. Repetera för föreskrivet antal högar:
 - a. Generera partiklar genom regning i en hög
 - b. Dra ut högen i en förbestämd riktning med hjälp av ett rätblock
2. För resulterande bädd, dela upp bädden i kvadratiska celler och mät följande egenskaper i varje cell:
 - a. Ytvikt
 - b. Graderingstal
 - c. Storleksmått
 - d. Maxfel
 - e. Avvikelse från volymbaserad storleksmedian

Fem olika fall studeras. Dessa skiljer i antal högar, högarnas placering samt utbredningarnas riktning. I Figur 29 illustreras de fem fallen A-E. I studien används en referensfördelning med storleksintervall 5-38 mm. Bäddens måltjocklek är 15 cm. Bäddens målstorlek är $1.4 \times 1.4 \text{ m}^2$ men eftersom det uppstår slutningar i ytterkanter kommer resulterande bäddstorlek avvika från målet.

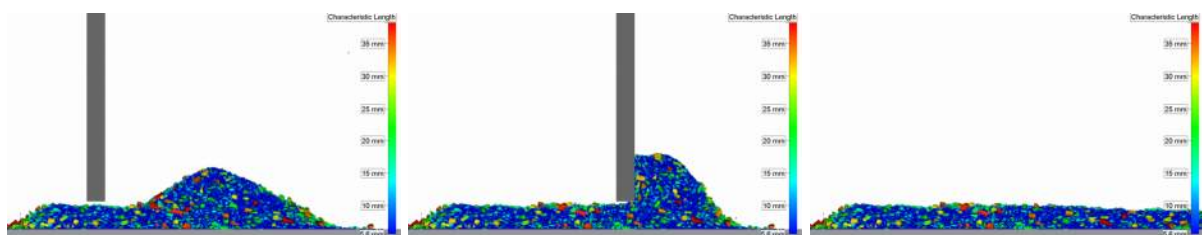


Figur 29. Illustration av de fem fall som studeras för utbredning av kvadratisk provyta. De blå ytorna visar var högarna läggs ut. Procentsatsen är massandelen i varje hög sett till total massa som kommer dras ut över provytan. De röda pilarna beskriver utdragningens riktning.

I Figur 30 ses tre bilder från simulering av Fall A där först den genererade högen visas. Sen visas rätblocket när det passerat igenom halva högen och slutligen den resulterande utdragna bädden. I övriga fall, B-E, där flera högar genereras kommer material genereras över redan existerande bädd från tidigare stegs utdragningar. Detta illustreras i Figur 31 där bilder visas från simulering av Fall B under utdragning av andra högen.



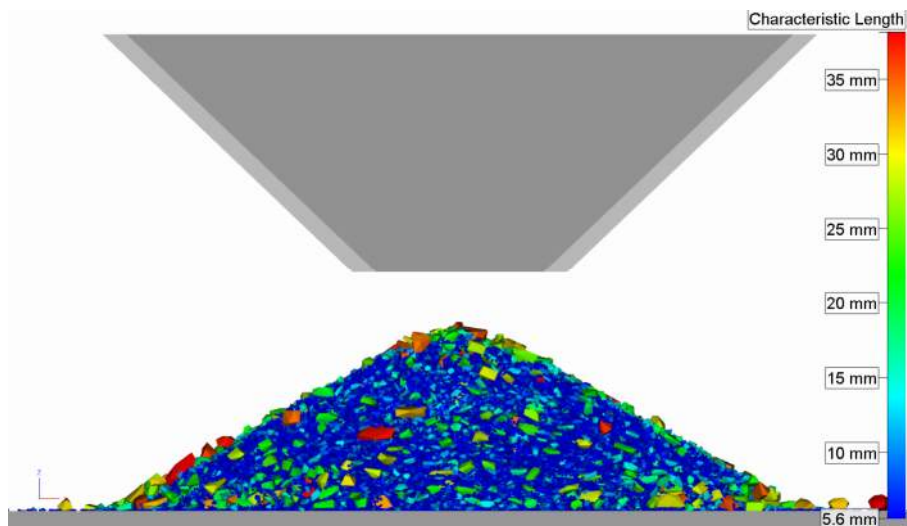
Figur 30. Bilder från simulering av Fall A före, under och efter utdragning.



Figur 31. Bilder från simulering av Fall B före, under och efter utdragning av andra högen.

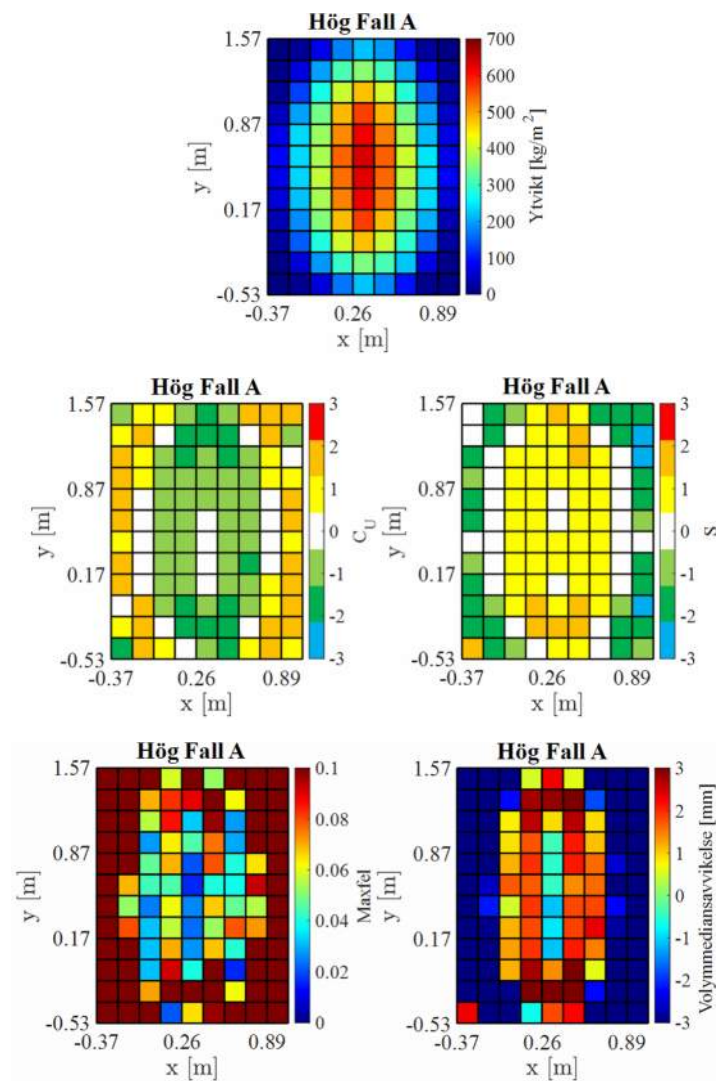
För varje fall delas domänen in i ett kvadratisk rutnät där egenskaper mäts i varje cell för att möjliggöra studie av egenskapernas rumsliga variation. De egenskaper som mäts är ytvikt, graderingstal, storleksmått, maxfel och volymmedianavvikelse. Avvikelserna beräknas utifrån fördelningen av alla partiklar i hela rutmönstret vilken är ungefär samma som referensfördelningen bortsett från att vissa partiklar kan ha fallit utanför rutnätets utbredning, dessa är då ej inräknade.

I Figur 32 visas den genererade högen för Fall A och den tratt som partiklarna regnas ner i för att skapa högen. Denna tratt gör att fler partiklar kan genereras samtidigt och samtidigt hålla en låg volymfraktion för generationsdomänen.



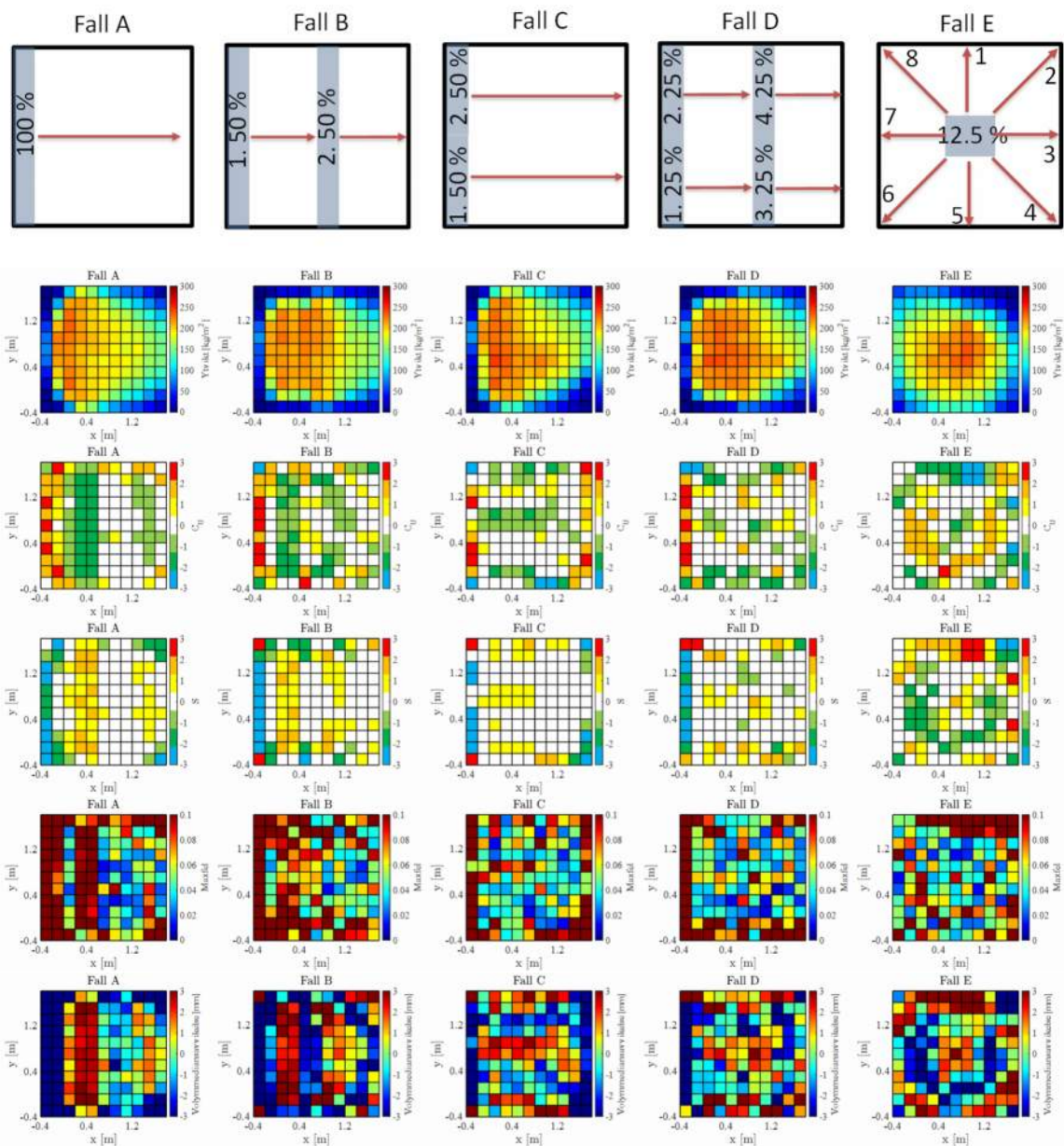
Figur 32. Bild från simulering efter generering av högen i Fall A. Partiklar regnas ner i tratten som visas över högen.

I Figur 33 visas karaktäristik för högen i Fall A före utdragning. Detta visar den segregering som uppstår i en hög genererad genom regning. Det framgår att det uppstår ett överskott av små partiklar på högens sluttningar.



Figur 33. Karaktäristik för högen i Fall A, genererad genom regning. Varje cell har storlek 17.5 cm x 17.5 cm.

Resultaten för de resulterande bäddarna i Fall A-E ses i Figur 34. Varje cell är 20 cm x 20 cm vilket med en bäddtjocklek på 15 cm, en antagen packningsdensitet på 0.7, och en materialdensitet på 2700 kg/m² ger en provmängd på 11.3 kg vilket motsvarar en ytvikt på 283.5 kg/m². En provmängd på 11.3 kg motsvarar ett medelmaxfel på 0.022 enligt ekvation (1.4) och 5 % av proverna kommer ha ett maxfel på över ungefär 0.044.

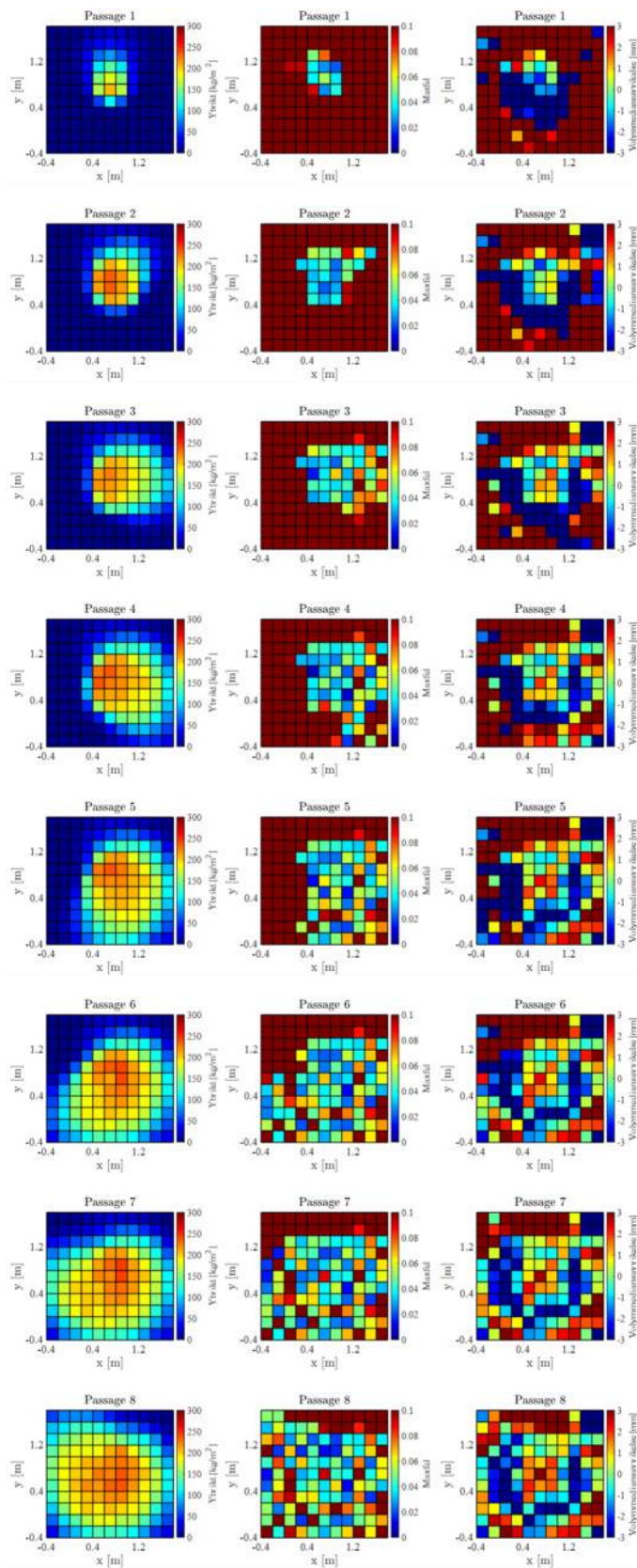


Figur 34. Resultat för utbredning av kvadratisk provyta. Varje fall, A-E, motsvarar en kolumn ovan. I varje kolumn visas i ordning: utläggningsschema, resulterande ytvikt, graderingstal, storleksmått, maxfel, samt volymmedianavvikelse.

Resultaten visar att det sker olika segregeringar. I Fall A ses en vertikal zon där det finns ett överskott på fina partiklar. Denna zon sammanfaller ungefär med där högen genererats. I Fall B ses liknande vertikal segregering som i Fall A, men även en ytterligare vertikal segregering men svagare där hög två placerats. Anmärkningsvärt är att inte samma vertikala segregering ses i Fall C och Fall D, dock verkar det vara en horisontell segregerad zon med överskott av finare partiklar mellan nedre och övre delen av bädden. I dessa två fall lades först högar i nedre halvan av bädden och sedan i övre, vilket relaterar till denna observation.

Generellt ses en ansamling av grovt material i bäddens yttre kant, en effekt som är starkare i vänstra och högre randen i jämförelse med övre och undre. Speciellt är segregeringen i överkant och underkant mycket mindre, om ens existerande, för Fall C och Fall D. Notera också de områden där maxfelet är 0.1 eller högre.

För Fall E verkar det ske en segregering i en dryg halvcirkel runt bäddens mittpunkt. För att bättre kunna analysera Fall E visas i Figur 35 ytvikt, maxfel och volymmedianavvikelse efter varje av de åtta passager som görs under bäddens uppbyggnad. Där ses hur den segregerade halvcirkeln med övervikt av stora partiklar byggs upp.



Figur 35. För Fall E i Figur 34 visas här ytvikt, maxfel och volymmedianavvikelse efter varje av de åtta passager som sker.

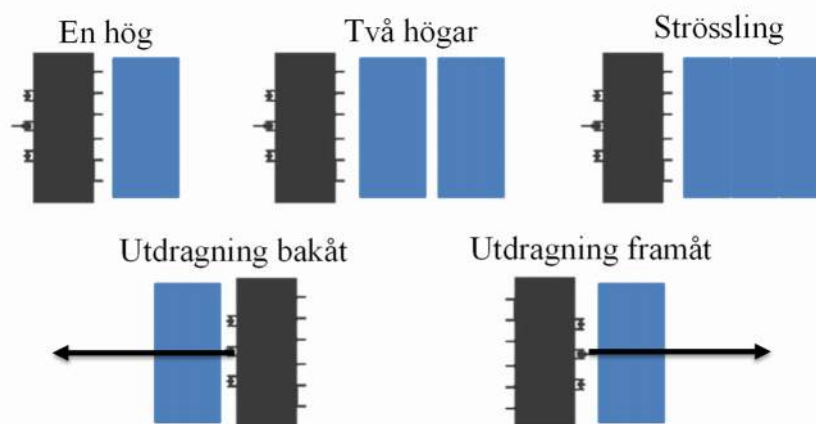
6.2 Utbredning i kanalyta

I detta avsnitt beskrivs en simuleringsstudie där material fylls i en skopa som sedan håller ut materialet i en hög och därefter dras högen ut med hjälp av skopan. För att möjliggöra simuleringar där större delen av skopan är fylld i höjdlängd så begränsas domänen enligt en kanal. Detta innebär att inte hela skopans bredd inkluderas. Variation av uppställningen som studeras är en eller två högar samt utdragning bakåt eller framåt. Dessutom simuleras utströsling av material från skopa och sedan utdragning framåt eller bakåt av resulterande bädd.

I studien används en referensfördelning med storleksintervall 5–38 mm. Bäddens måltjocklek är 20 cm. Kanalens bredd är 38 cm. De olika fall som simuleras är

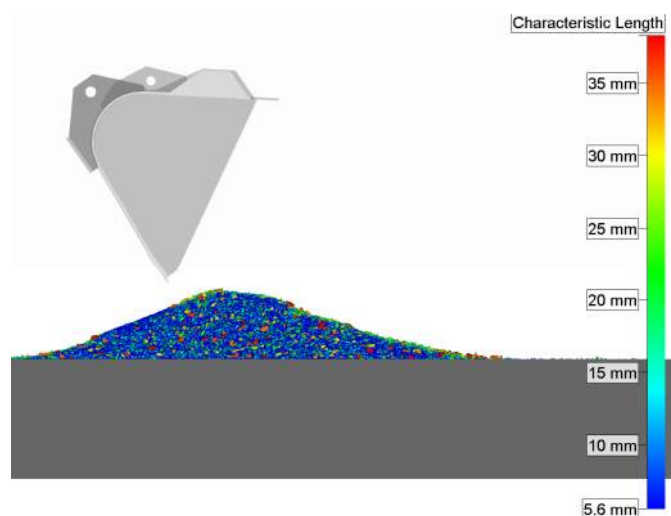
- En hög
 - Utdragning bakåt
 - Utdragning framåt
- Två högar
 - Utdragning bakåt
 - Utdragning framåt
- Strösling
 - Utdragning bakåt
 - Utdragning framåt

Se Figur 36 för illustration av de olika sekvenserna.

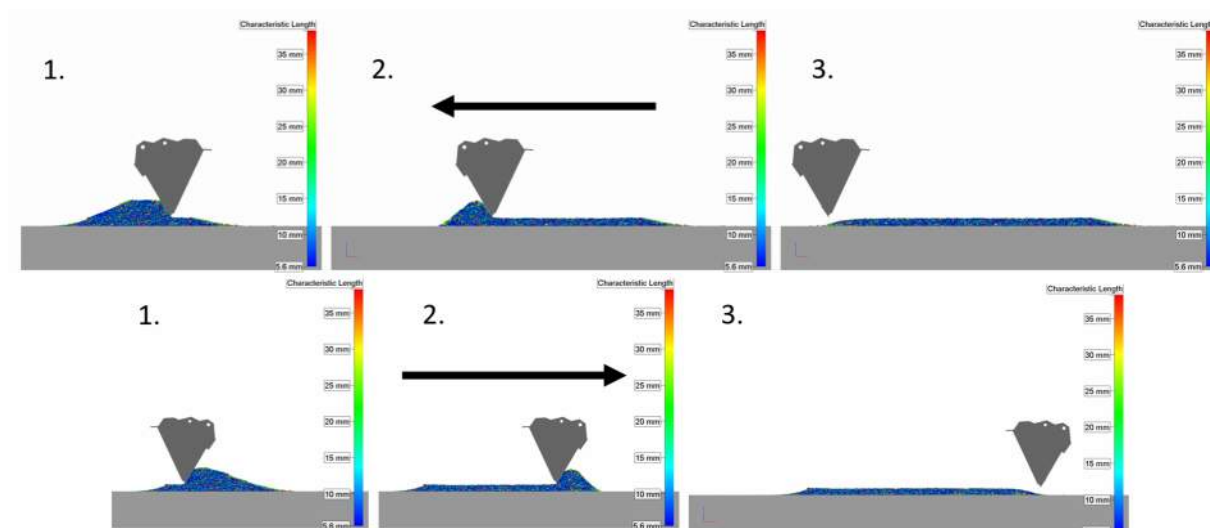


Figur 36. Illustration av olika sekvenser i de simuleringsstudier som utförs för utbredning i kanalyta.

I Figur 37 visas bild från simulering av det genererade materialet i fallet för en hög. I Figur 38 visas bilder från simulering på skopans rörelse vid utdragning bakåt respektive framåt. Utdragning bakåt motsvarar att lastmaskinen håller ut materialet i en hög och sedan drar med sig högen bakåt genom att backa. Utdragning framåt motsvarar att en lastmaskin håller ut materialet i en hög och att det sedan kommer en lastmaskin från andra hållet och drar ut högen genom att backa. Skillnaden framgår om skopans orientering noteras i bilderna.



Figur 37. Bild från simulering på en hög efter uthällning av material från skopa.

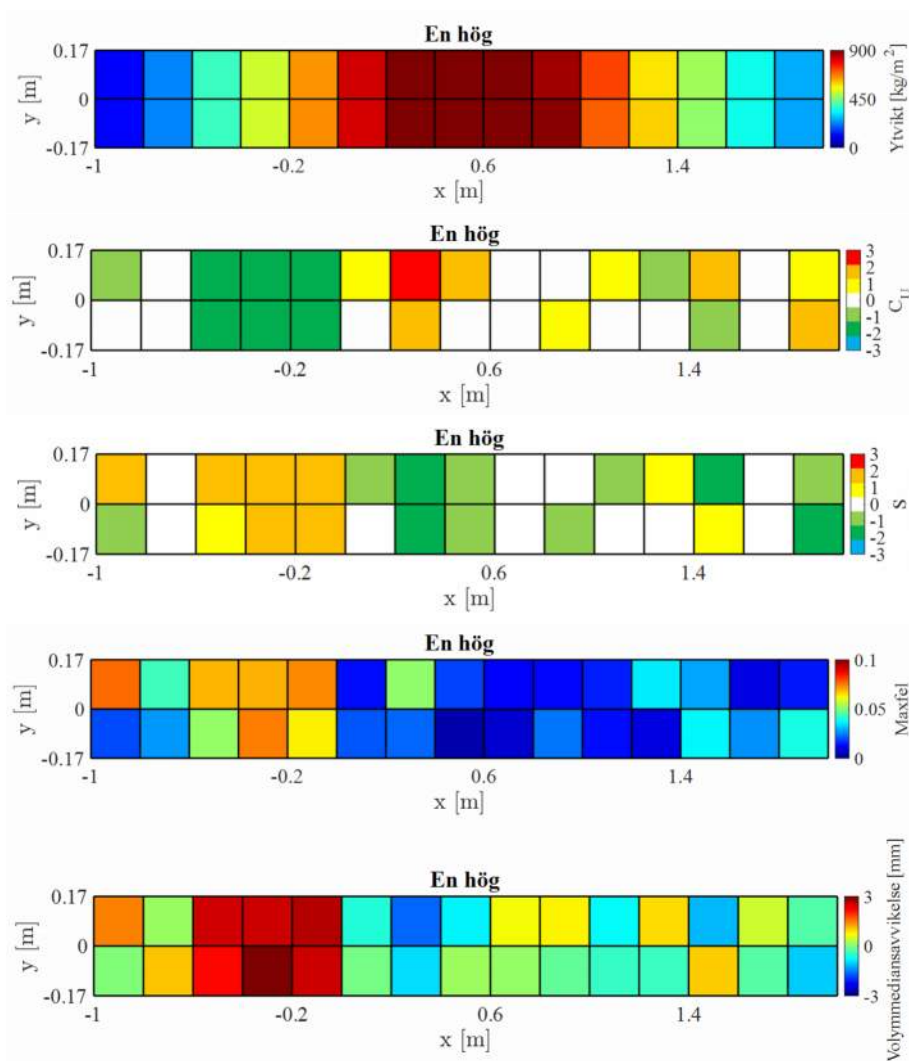


Figur 38. Bilder från simulering som visar utdragnig av en hög. I övre raden visas en sekvens av bilder för utdragnig bakåt. I nedre raden visas en sekvens av bilder för utdragnig framåt.

I följande avsnitt presenteras resultaten från delstudierna med en hög, två högar och med strösling. Likt tidigare analys delas bädden in i celler och ytvikt, graderingstal, storleksmått, maxfel och volymmedianavvikelse beräknas i varje cell för att se variation och trender över de resulterande bäddarna. Varje cell har storlek 20 cm x 17 cm och med en antagen packningsdensitet på 0.7, materialdensitet på 2700 kg/m³, samt en bäddtjocklek på 20 cm motsvarar en cell en provmängd på 12.9 kg. Det motsvarar en ytvikt på 378 kg/m². Notera att enbart partiklar i den randreducerade domänen inkluderas i resultatalkylen.

6.2.1 Resultat en hög

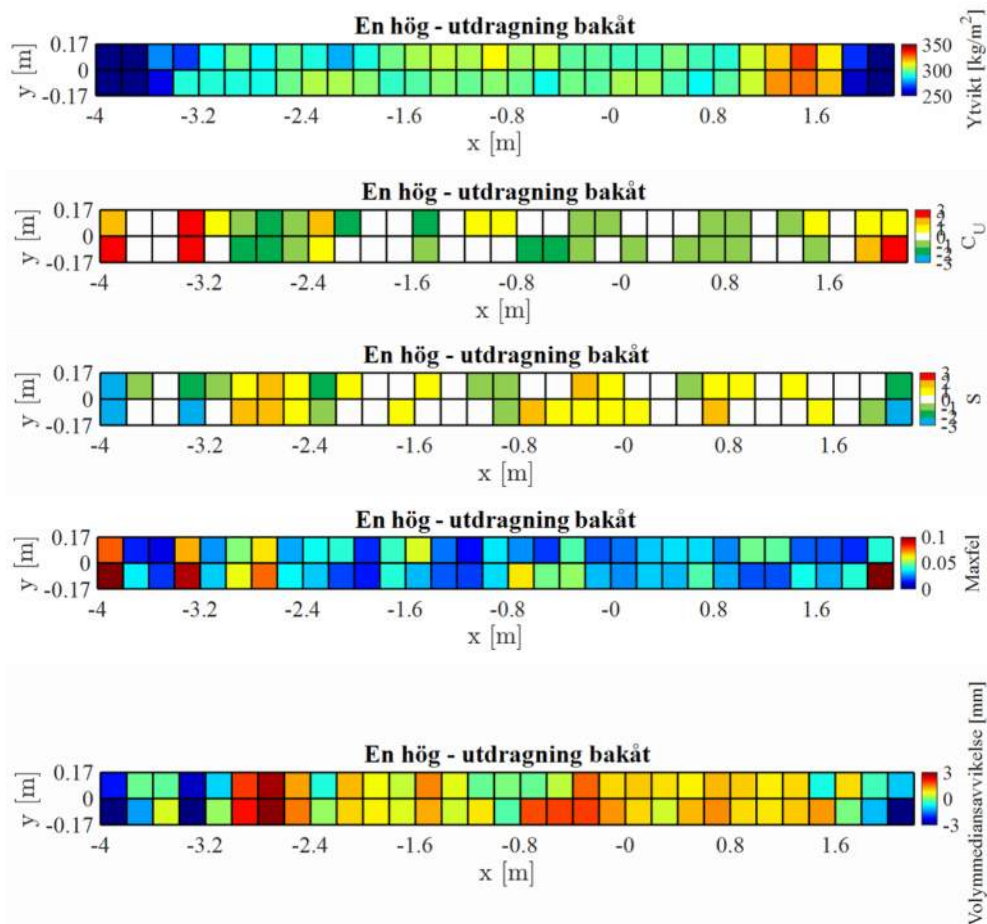
I Figur 39 visas karaktäristik för en hög uthåll från en skopa. Detta visar hur den initiala högens fördelning ser ut. Från ytviktsdiagrammet ses var den högsta punkten av bädden är positionerad. Vidare ses att det uppstår en segregering på högens vänstra sida, den som är riktad mot lastmaskinen vid uthällning. Vid högens nedre kant på denna sida är det en överrepresentation av små partiklar. Precis innan högens topp på samma sida är det en mindre zon där stora partiklar är överrepresenterade. Denna asymmetri i högens initiala fördelning kommer rimligen påverkas av utbredningens riktning vilket visas i nästföljande figurer. Notera att ingenstans i den initiala högen är maxfelet större än 0.1.



Figur 39. Karaktäristik för en hög uthåll från skopa.

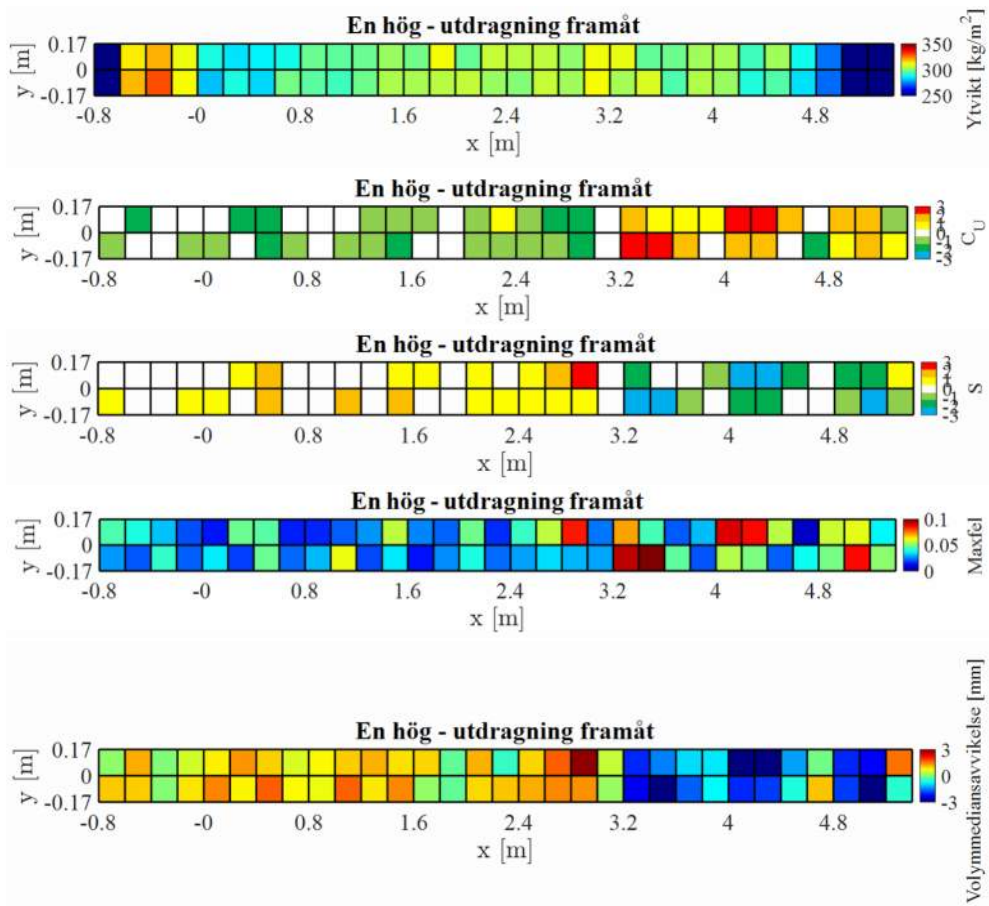
I Figur 40 visas karaktäristik för bädden efter utdragning bakåt. Ytvikten varierar längs med utdragningens riktning och ligger runt 300 kg/m² vilket motsvarar en bäddtjocklek

på 16 cm. Längst till höger vid utdragningens startpunkt och längst till vänster vid dess slutpunkt är ytvikterna betydligt lägre på grund av brist på material. Sett till maxfel är avvikelserna relativt låg över hela bädden bortsett från start och slutpunkt. Detta indikerar en väl fungerande utbredningsmetod. Storleksmättet visar att det finns viss avvikelse från medelvärdet med både områden med övervikt åt mindre respektive åt större partiklar.



Figur 40. Resultat för en hög uthåll med skopa och sedan utdragen bakåt.

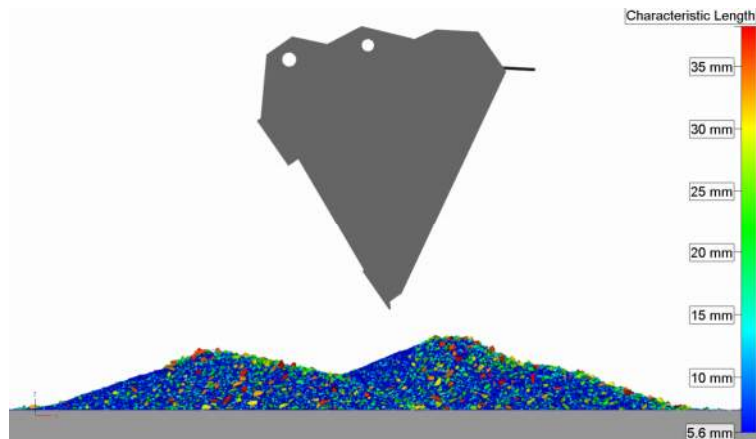
I Figur 41 visas resultatet för utdragning framåt. I detta fall ses en tydlig segregation i bäddens högra del, det vill säga där skopan drar ut sista delen av högens material. I denna del är det ett underskott på finare partiklar. Ett överskott på finare partiklar ses i bäddens vänstra del men över en större yta och därmed av mindre magnitud. Maxfelet är överlag lågt men stiger upp mot 0.1 för den segregerade zonen till höger.



Figur 41. Resultat för en hög uthållt med skopa och sedan utdragen framåt.

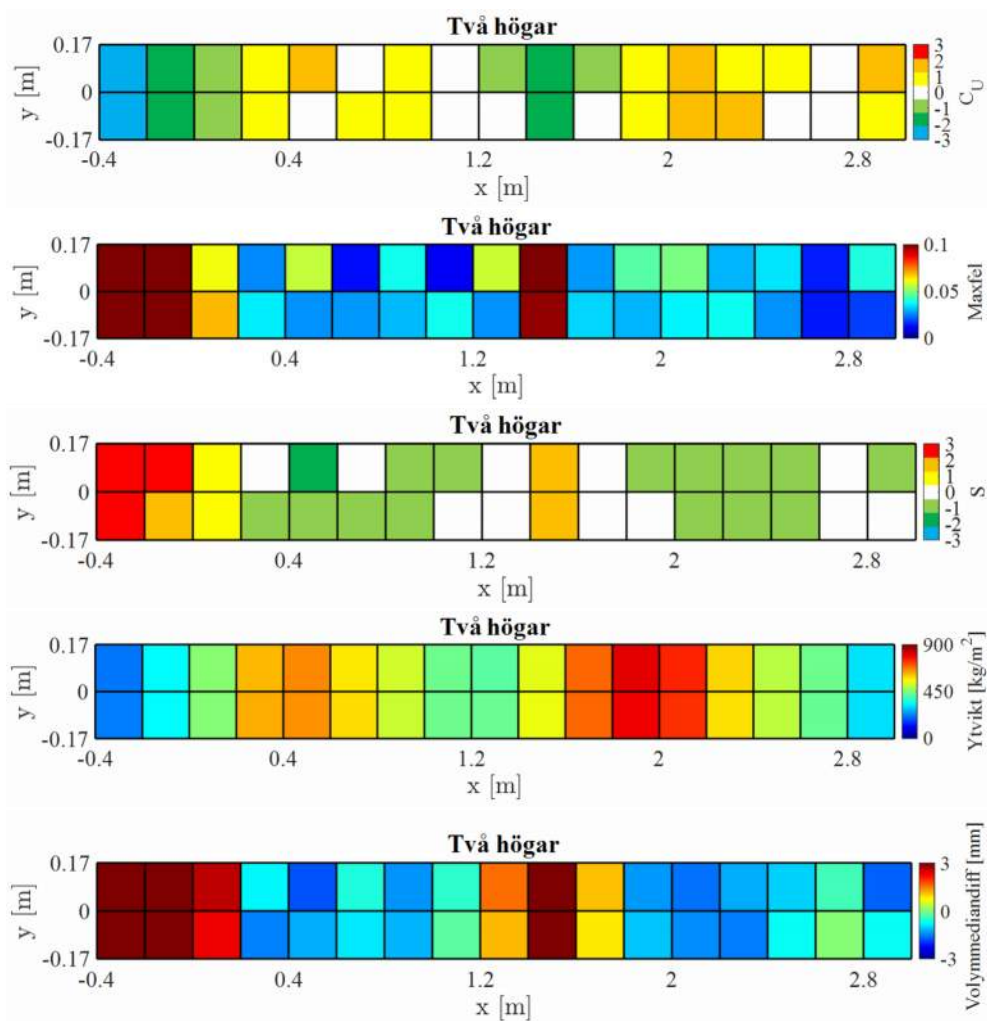
6.2.2 Resultat två högar

I detta avsnitt presenteras resultat för utbredning av två högar. Dessa högar innehåller hälften så mycket massa som i studien med en hög. I Figur 42 ses bild på högarna efter simulering. Andra högen hålls ut till höger om första och överlappar första högen.



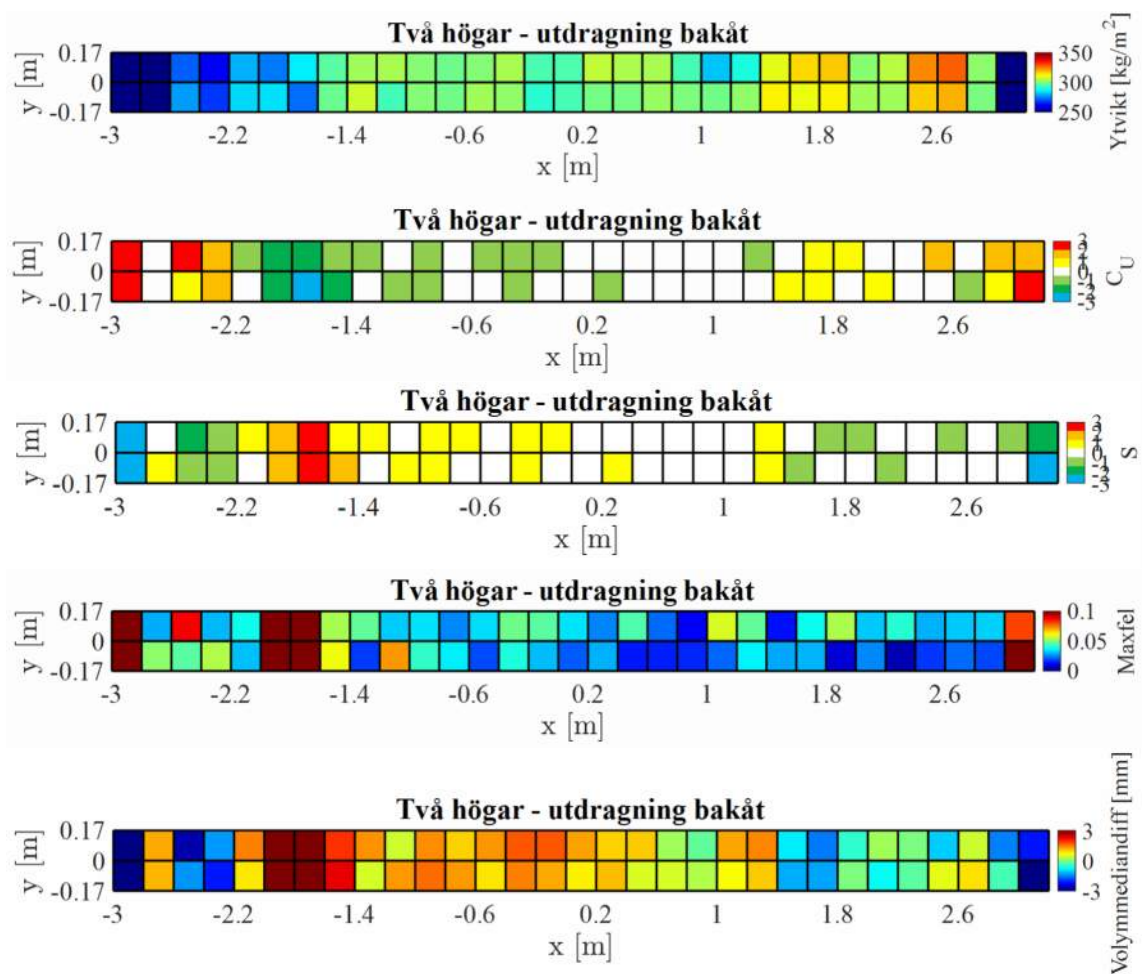
Figur 42. Bild från simulering i Demify av uthållning av två högar. Vänstra högen hålldes ut först, därefter högen till höger.

Karaktäristiken för de två högarna ses i Figur 43. Liknande segregering som för en hög ses även här men för båda högarna. På sidan mot lastmaskinen uppstår en zon med överskott av fint material. Underskott av fint material är utspritt över resterande delar av högarna.



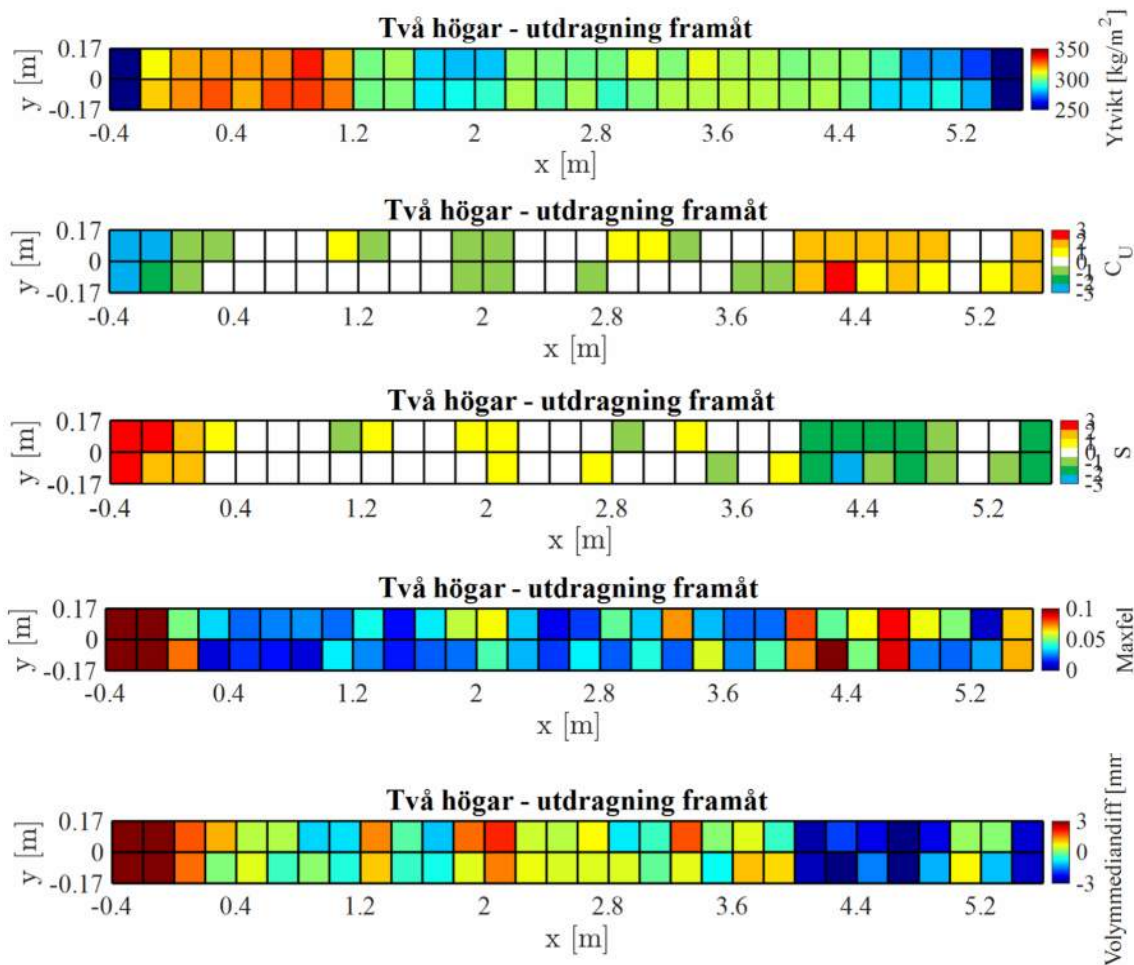
Figur 43. Karaktäristik för två högar uthållda från skopa. Vänstra högen deponerades först och därefter den högra.

I Figur 44 visas karaktäristik för utdragnings bakåt av två högar. Likt för en hög med utdragnings bakåt uppstår en segregering med överskott av fina partiklar mot slutet av bädden och därefter en zon med överskott av stora partiklar. I övrigt blir bädden jämn med små avvikelser i maxfel och andra mått.



Figur 44. Resultat för uthållning av två högar med efterföljande utdragning bakåt.

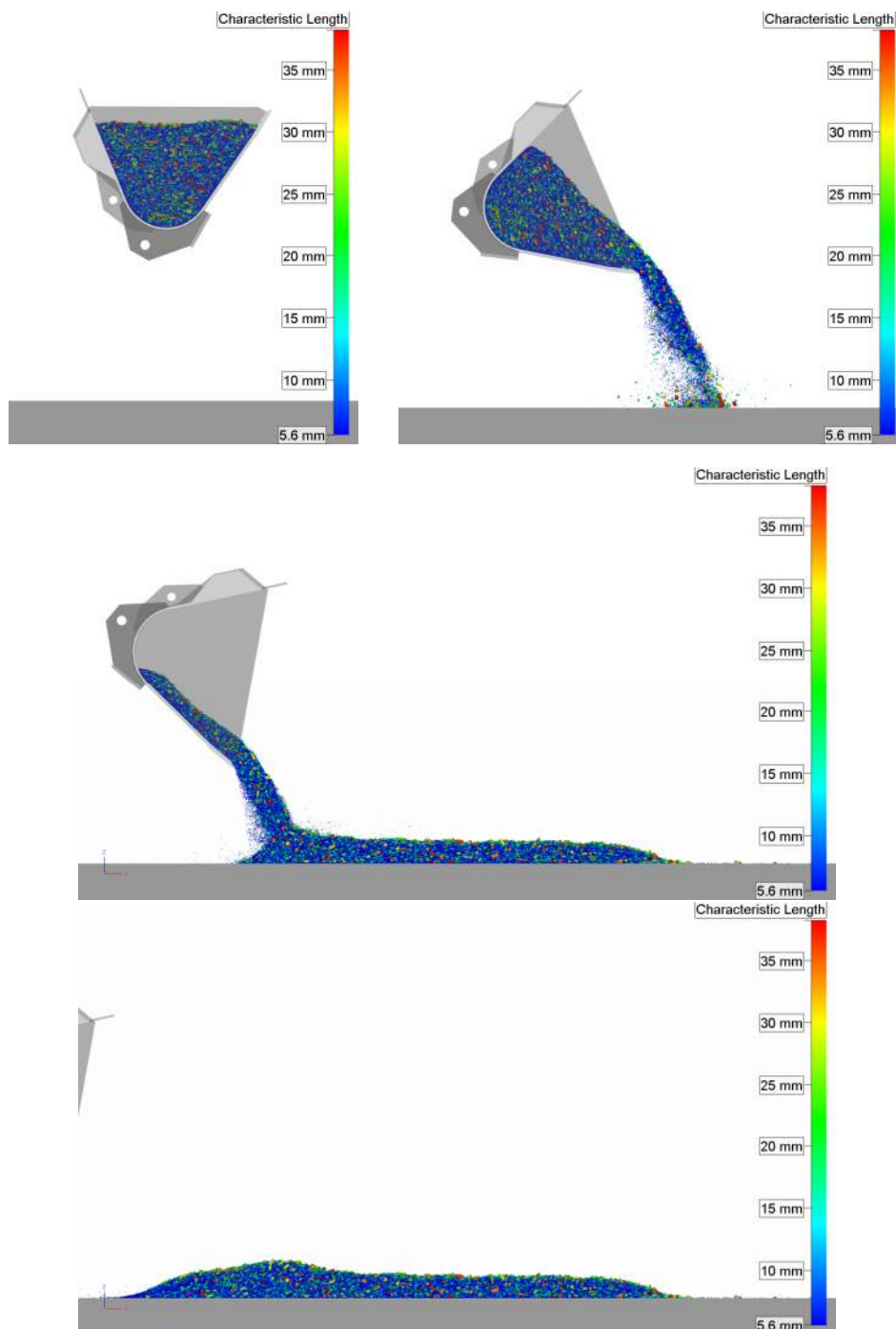
I Figur 45 visas resultat för utdragning framåt av två högar. Likt för en hög uppstår en längre zon i slutet (höger) av bädden med segregering med överskott på stora partiklar. Precis i början (vänster) av bädden är ett överskott på fina partiklar från vänstra högen. Däremellan är bädden jämnt utbredd och maxfelet är lågt bortsett från några enskilda celler.



Figur 45. Resultat för uthållning av två högar med efterföljande utdragning framåt.

6.2.3 Resultat strössling

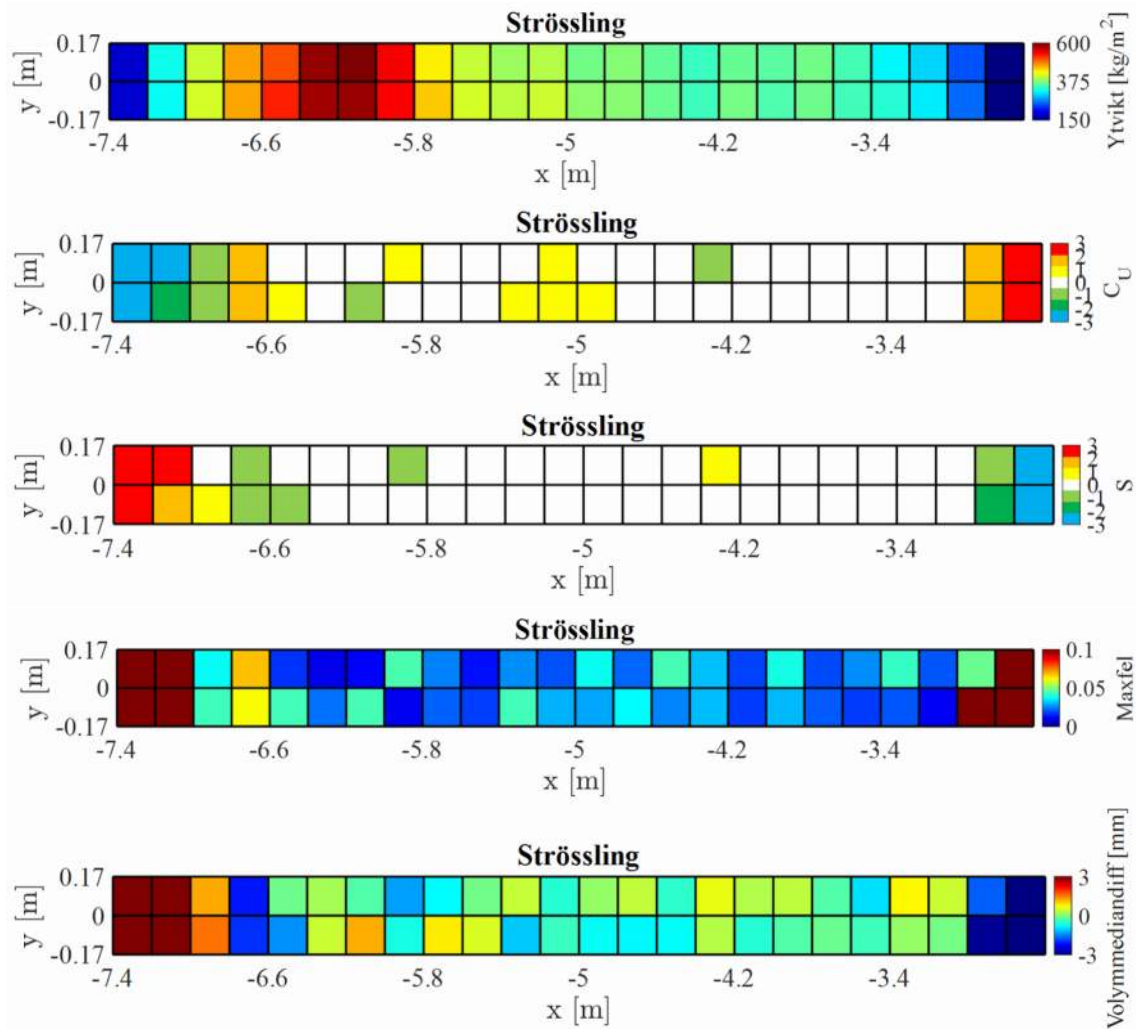
I detta avsnitt läggs materialet ut genom att strösslas från skopan i stället för att hällas i en hög. Detta görs genom att uthållningen sker samtidigt som skopan förs bakåt. Detta förlopp visas i Figur 46. Båddens egenskaper beräknas på samma sätt som tidigare. Dessutom gör utdragning framåt och bakåt av bädden för att se hur detta påverkar egenskaperna.



Figur 46. Bilder från simulering av strössling från skopa. Skopan roteras samtidigt som den förs bakåt och materialet hålls ut i en bädd.

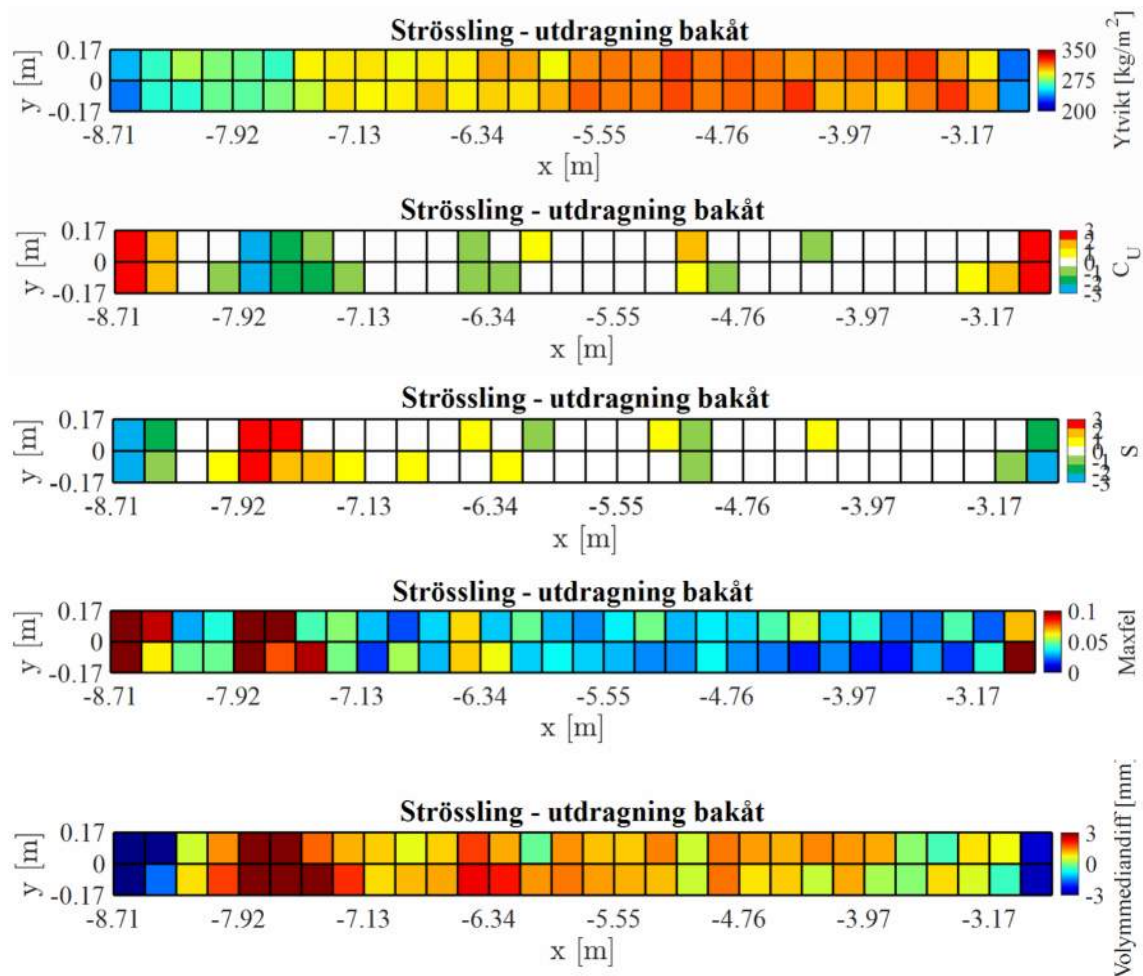
I Figur 47 ses karaktäristik för den utströslade bädden. Ytvikten visar att bädden har en puckel till vänster. För att undvika detta och uppnå så jämn bädd som möjligt krävs mer kontroll över skopans rotation och translationshastighet under utströssling. Vidare ses att det uppstår en segregering i början och slutet av bädden där ytvikten är låg. Där första materialet strösslades (till höger) är det överskott av stora partiklar och där sista materialet strösslades (till vänster) är det överskott av fina partiklar. I övrigt har

bädden en anmärkningsvärd låg avvikelse från referensfördelningen. Detta visar att strössling är en bra metod för att skapa en bädd med jämn partikelfördelning.



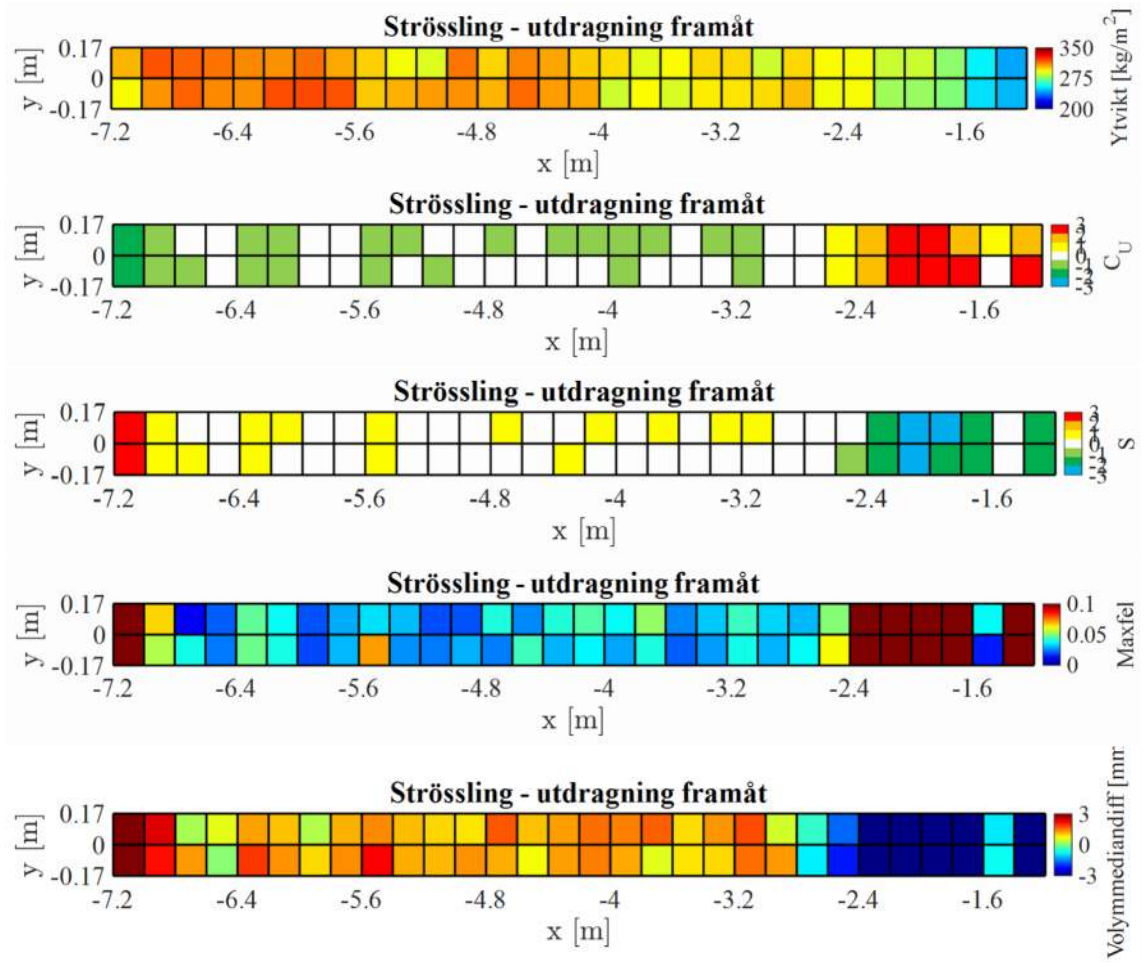
Figur 47. Karaktäristisk för bädd skapad genom strössling från skopa.

I Figur 48 ses bäddens karaktäristik efter att ut den strösslade bädden dragits ut bakåt. Notera nu att längden på bädden ökat i jämförelse med resultaten för enbart strösslad bädd. Det uppstår segregering i området till vänster om den strösslade bäddens utbredning med först en zon med överskott på små partiklar och sedan en zon med överskott på stora partiklar. Utdragningens påverkan på fördelningen i området där den ursprungliga strösslade bädden fanns verkar vara liten.



Figur 48. Resultat för strösslad bädd med efterföljande utdragning bakåt.

I Figur 49 ses karaktäristik för bädden efter utdragning framåt av den strösslade bädden. Nu uppstår i stället en tydlig segregation i bäddens högra del på liknande sätt som skedde vid utdragning framåt av en och två högar. Utdragningens påverkan på den ursprungliga strösslade bädden är liten även om det uppstått ett litet överskott av små partiklar i flera celler.



Figur 49. Resultat för strösslad bädd med efterföljande utdragning framåt.

7 Diskussion och slutsatser

Projektets första etapp har demonstrerat användningen av den diskreta elementmetoden (DEM) för att simulera utläggning och provtagning av obundna material, med fokus på bärlager av kornstorleksfördelning 0–32 mm. Genom att simulera idealiserade utläggningsscenarion har projektet skapat referensmodeller och statistiska mått för att analysera hur olika utläggningsmetoder påverkar kornstorleksfördelningen och verifiera bästa metoder för provtagning. Kalibreringen av materialmodellen visade att de simulerade spännings-töjningskurvorna stämde väl överens med experimentella data, vilket bekräftar att simuleringarna kan användas för vidare studier. Nedan listas slutsatser från arbetet.

- **DEM-simulering av ideal referensutläggning**
 - Simuleringskapacitet: antalet partiklar styr simuleringarnas minnesförbrukning och stora antal (övre gräns runt 3-5 miljoner partiklar) är ej möjligt med rimlig prestanda. Antalet partiklar per massenhet bestäms av storleksfördelningen och beror extra mycket på storleksfördelningens undre gräns. Höjs undre storleksgränsen kan större massor simuleras men segregeringseffekter blir mindre tydliga. Hålls storleksgränsen låg behöver smarta simuleringsuppställningar köras med domänbegränsningar. I detta arbete användes en kanal parallell med utbredningens riktning.
 - Provtagningsmängd: flertalet studier i detta arbete visar hur maxfelet mellan en referensfördelning och provets fördelning beror på provmängden samt dess statistiska variationen. Felet varierar enligt en Kolmogorov-fördelningen om provets tas från en yta som följer referensfördelningen. Det förväntade medelfelet kan simuleras fram och en potenslag kan anpassas till simuleringsresultatet. Denna ekvation kan sedan användas för att beräkna medelfelet för en given provmängd. Felet påverkas inte av en trunkering av storleksfördelning nedifrån om detta görs enligt metoden massbevaring. Den visade simuleringsmetoden kan användas för att simulera fram provmängdrelationer för olika storleksfördelningar och partikelformer. Resultaten i detta arbete visar att för en provmängd på 10 kg och en provyta med korrekt fördelning förväntas ett medelmaxfel på 0.023 och 5 % av proverna kommer ha ett maxfel över 0.05. Om provet är 28 kg kommer medelmaxfelet vara 0.015 och endast 5 % av proverna kommer av slumpen ha ett fel som är över 0.03 vilket är gränsen för vad som skulle kunna vara ett prov som ligger utanför gränskurvorna i Figur 8.
 - Randeffekter vid strukturer: material som placeras ut bredvid strukturer som väggar påverkas på så sätt att storleksfördelningen kan snedvridas i områden nära strukturerna. Därför behövs provtagning nära strukturer göras med extra försiktighet. Detta har studerats på en teoretisk nivå och vidare studier för praktiska situationer är önskvärt.
 - Volymfraktioner vid generering av partiklar i DEM-simulering: under detta arbete observerades att volymfraktionen mellan partiklarnas volym och generatordomänens volym kan kraftigt påverka den resulterande

storleksfördelningen om fraktionen är för hög. Detta måste beaktas när partiklar genereras i DEM-simuleringar.

- Ideala referensbäddar: Bäddar som genereras idealt med regning rakt ovanför bäddens yta och med tillräcklig volymfraktion får en storleksfördelning vilken följer Kolmogorov-Smirnovs teori. Detta innebär att maxfelets storlek i relation till provmängden följer de ekvationer som nämns ovan, samt att variationen följer en Kolmogorov-fördelning. Detta gäller om den randreducerade delen av bädden används som provyta och referensfördelning. Det vill säga, om randeffekterna nämnda ovan bortses från. Detta visar att segregationseffekter uppstår i andra steg när bärlagerbäddar skapas, till exempel vid hantering av material i försteg, vid fyllning av lastredskap, vid uthållning eller vid utbredning.
- **DEM-simulering av utläggningsscenarion**
 - Skapande av materialhög via regning: när partiklar regnas ner i en tratt för att skapa en hög uppstår en segregering och det resulterar i ett överskott av fina partiklar på högens sluttningar nära högens topp.
 - Skapande av materialhög vid uthållning från skopa: när en skopa fylls med regning och denna skopa sedan håller ut materialet i en hög uppstår en segregering liknande för en regnad hög men segregeringen sker endast på sidan mot lastmaskinen. Där uppstår ett överskott av partiklar i sluttningens övre del.
 - Utdragning av högar för kvadratisk provyta: vid utdragning i en riktning av regnade högar uppstår segregering i den resulterande bädden i zonen där högen skapades. Där uppstår ett överskott av fina partiklar. När flera mindre högar används minskar omfattningen av segregeringen. För bädd skapad genom högar som hålls ut på samma ställe och dras ut i flera riktningar uppstår en annan typ av segregering i en cirkelformad zon med överskott på stora partiklar.
 - Utdragning av högar skapade via uthållning från skopa: när högar hålls ut från skopa och sedan dras ut med skopa blir bäddens segregering olika beroende på utdragningens riktning. När lastmaskinen håller ut högen och sedan drar ut med skopan genom att backa uppstår en mindre zon med segregering där material sist drogs ut. När lastmaskinen håller ut högen och sedan drar ut materialet i motsatt riktningen uppstår en större zon med överskott av stora partiklar där materialet sist drogs ut.
 - Strössling av bäddar från skopa: vid utströssling från skopa genom att backa samtidigt som materialet hålls ut skapas de minst segregerade bäddarna. Endast precis i början och precis i slutet av bäddarna uppstår viss segregering. Om utdragning sker på den utströsslade bädden uppstår samma typ av segregering som för resultatet i punkten ovan. Den ursprungliga bädden påverkas dock lite och segregering sker främst i den nya bädden som uppstår med materialet som dragits med.

Etappens resultat indikerar att DEM-modellen och de utvecklade metodikerna ger relevanta insikter kring materialhantering och provtagningens noggrannhet.

8 Fortsatta studier

Utifrån slutsatserna i denna etapp av projektet ses behovet av fortsatta studier för simulering och utvärdering av:

- Utläggningsscenario inklusive provtagningsförfarande i industriell produktionsmiljö där olika utläggningstekniker studeras för fler verifierande fältmätningar samt utökade simuleringar med syfte att säkerställa och förfinas rekommendationer för industrin.
- Grövre fraktioner (+0/-90, +0/-150, +0/-300, +0/-600), i relation till både utläggning och provtagning. För grova fraktioner är experimentell samt laboratorieanalys mycket arbetskrävande vilket gör simuleringsmetoden attraktiv.
- Cirkulära material med avvikande kohesiva och granulära egenskaper jämfört med jungfruligt material där utläggningstekniken behöver anpassas efter aktuella materialegenskaper.

9 Referenser

- [1] K. Hermelin, "Motivet för TRV:s kravställning på obundna överbyggnadslager - Presentation på Metoddagen 2022," 2022.
- [2] J. Quist, A. Bilock, K. Jareteg och A. Persson, "SBUF 13820 - Undersökning av separationseffekter vid kompaktering av obundna material," Göteborg, 2021.
- [3] J. Quist, F. Hunger och K. Jareteg, "SBUF 13638 - Segregation of rock materials during unloading," Göteborg, 2019.
- [4] J. Englund och L. Stenlid, "MOTTAGNINGSKONTROLL AV OBUNDNA VÄGMATERIAL - Projekt 14067," 2023.
- [5] K. Hermelin, "Obundna lager för vägkonstruktioner - TDOK 2013:0530," Trafikverket, 2017.
- [6] *SS-EN 933-1:2012 - Ballast – Geometriska egenskaper –Del 1: Bestämning av kornstorleksfördelning – Siktning.*
- [7] K. Hermelin, "Provtagning av obundna material - TDOK 2014:0151," Trafikverket, 2014.
- [8] P. A. Cundall och O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies," *Geotechnique*, vol. 29, pp. 47-65, 1979.
- [9] C. O'Sullivan, "Particle-based discrete element modeling: Geomechanics perspective," *International Journal of Geomechanics*, vol. 11, pp. 449-464, 2012.
- [10] N. Govender, D. N. Wilke, S. Kok och R. Els, "Development of a convex polyhedral discrete element simulation framework for NVIDIA Kepler based GPUs," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 270, pp. 386-400, 2014.
- [11] F. Nader, P. Pizette, N. Govender, D. Wilke och J.-F. Ferrellec, "Modelling realistic ballast shape to study the lateral pull behaviour using GPU computing," *EPJ Web of Conferences*, vol. 249, p. 06003, January 2021.
- [12] A. Bilock, "A GPU Polyhedral Discrete Element Method - Formulation and implementation of large scale simulations for non-spherical particles using novel GPU techniques," Gothenburg, 2020.
- [13] S. Ji, S. Sun och Y. Yan, "Discrete Element Modeling of Rock Materials with Dilated Polyhedral Elements," *Procedia Engineering*, vol. 102, pp. 1793-1802, 2015.

[14] W. Jia, V. Markine, Y. Guo och G. Jing, "Experimental and numerical investigations on the shear behaviour of recycled railway ballast," *Construction and Building Materials*, vol. 217, p. 310 – 320, 2019.

[15] SIS, *SS-EN 13450 - Aggregates for railway ballast*, 2003.