

Större neddelare för ballastprov

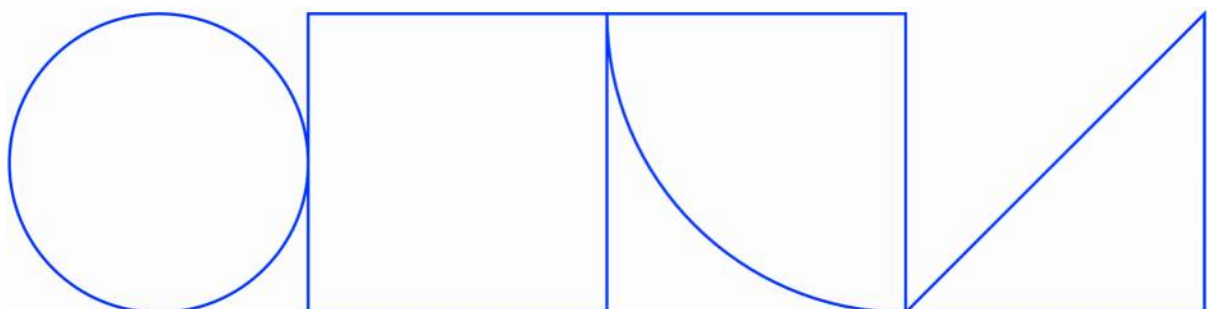
Johannes Quist, Negar Sani

Fraunhofer-Chalmers Center

Martin Blohm, Edo Sijaric, Lars Stenlid, Jan Englund

Skanska Sverige AB

2025-04-22



Förord

Projektet är en inledande studie över neddelning av ett större produktionsprov av ballastmaterial till ett laboratorieprov. Ballastmaterial av olika fraktioner har undersökts. En metodik med en större neddelare har tagits fram genom en iterativ process där digitala prototyper tagits fram med efterföljande kontroll av funktion genom simulering med hjälp av diskret elementmetod (DEM). Framtagande av digitala prototyper och genomförande av digitala simuleringar har tagit en stor del av projekttiden.

Erfarenheter från bland annat SBUF-projekt 14280 "Utläggning och provtagning av obundet bärlager – Simulering med hjälp av DEM" och SBUF-projekt 14067 "Mottagningskontroll av obundna vägmateriäl". har använts. Simuleringarna har verifierats med ett nedskalat försök med hjälp av en fysisk prototyp. En utveckling av den fullskaliga prototypen planeras ske i kommande SBUF-projekt.

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. Även ett stort tack till Gustav Björkqvist för framtagandet av den fysiska prototypen och personalen i Gunnilse för analys av kornkurvor. Slutligen riktas ett mycket stort tack till SBUF, som varit huvudfinansiär av projektet och möjliggjort dess genomförande. Projektets organisation var:

Arbetsgrupp:

Martin Blohm	Skanska - digital prototyp
Edo Sijaric	Skanska - digital prototyp
Lars Stenlid	Skanska - neddelningsmetodiker
Jan Englund	Skanska - projektledare
Johannes Quist	FCC - arbetspaketledare DEM
Negar Sani	FCC - digital simulering

Referensgrupp:

Monica Soldinger Almefeldt	Swerock
Peter Martinsson	Swerock
Kristoffer Hofling	NCC
Lotta Liedberg	Svevia
Christian Hansson	Skanska

Johannes Quist, Negar Sani, Martin Blohm, Edo Sijaric, Lars Stenlid och Jan Englund

Göteborg 2025-04-22

Sammanfattning

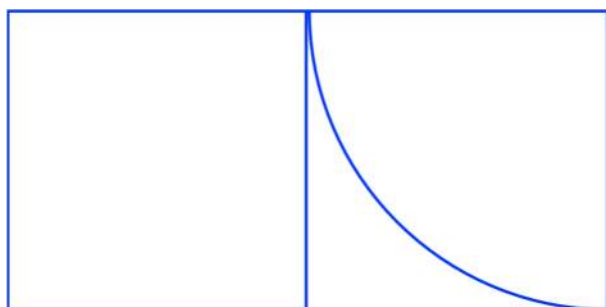
Vid tillverkning av ballastprodukter behöver det säkerställas att rätt produkt framställs avseende bland annat rätt kornstorleksfördelning. Dessa produkter provtas i samband med en tillverkningskontroll. Det är av största vikt att det prov som tas ut och analyseras, motsvarar den produkt som krossen producerar. Anläggningen ställer in krossar och siktar utefter provresultat från laboratorium. Är provet uttaget på ett felaktigt sätt återspeglar inte provresultatet produktens kvalité och produktionen ställs om i fel riktning och en avvikande produkt tillverkas. Detta är ett branschgemensamt problem som alla tillverkare av krossprodukter brottas med. Ett större uttaget prov, exempelvis från flödet i ett transportband innehåller resultat av produktion under en längre tidsperiod och blir representativt för den tillverkade produkten. Detta produktionsprov blir dock så pass stort att det behöver delas ned innan det transporteras till laboratorium.

Målet med projektet är att ta fram underlag för en metodik, som syftar till att kunna utföra en neddelning med en neddelare direkt vid en krossanläggning från ett större produktionsprov till ett laboratorieprov. Detta ska kunna ske utan att separationer sker samt utföras på ett säkert sätt. Metodiken har varit att i en iterativ process ta fram digitala prototyper, som testas genom flödessimuleringar med diskret elementmetod (DEM). Utefter resultaten av flödessimuleringarna justeras de digitala prototyperna för bättre prestanda avseende separationer och viktfördelningar. Flödessimuleringen på den digitala prototyp med bäst prestanda har därefter verifierats genom fysiska försök på en nedskalad fysisk prototyp. Målet med neddelningen har varit att ursprunglig kornstorleksfördelning i produktionsprovet ska likna laboratorieprovets. Ett antal neddelningsmetoder har studerats och utgångspunkten har till slut varit en traditionell neddelningsapparat vanligt förekommande i laboratorier.

Slutsatserna från projektet är att metodiken med att ta fram digitala koncept som simuleras och verifieras i fysisk prototyp har fungerat väl och uppfyllt projektmålen och att det är möjligt att konstruera en neddelare som tillfredsställande kan utföra en acceptabel neddelning till laboratorieprov både med avseende på viktfördelning och kornstorleksfördelning. Vidare framkom även att ska neddelning ske i fler steg i en och samma neddelningsapparat är det viktigt att bryta flödet med att byta håll på materialflödet för att få en jämnare viktfördelning. Det är även viktigt att bygga V-formade kanaler för att styra flödet för nästkommande neddelningssteg. Både resultat från simuleringar och fysiska försök visar på att en naturlig variation i kornstorlek är att förvänta och speciellt för grova sorteringar i förhållande till liten provmängd. I framtaget koncept behöver ett samlingsprov skapas av det material som ska tas om hand efter sista neddelningssteget. Det är viktigt att anpassa neddelningsapparaten till 2 gånger största stenstorlek för att undvika blockeringar. Fuktigt 0-material fastnar i neddelningsapparaten, vilket behöver ses över. Andra delar att arbeta vidare med är neddelning av långa fuktiga sorteringar med hög finhalt då dessa kan klumpa ihop sig i en neddelning och blockera någon kanal. Som ett nästa steg vore det önskvärt att utföra praktiska tester i fullskala. Detta skulle möjliggöra att fullt ut testa fraktioner upp till 0-90 och studera resultat och eventuella störningar under så verkliga förhållanden som möjligt.

Innehåll

1	Bakgrund	4
2	Mål och syfte	7
3	Metod	7
4	Genomförande	8
4.1	Förstudie	8
4.2	Digital prototyp	8
4.3	Digital simulering	9
4.4	Verifiering av flödessimuleringar	10
5	Resultat (och analys)	10
5.1	Förstudie	10
5.1.1	Kvartering	10
5.1.2	Neddelningsapparat	11
5.1.3	Rotationsneddelare	15
5.1.4	Andra typer av neddelare	16
5.1.5	Precisionen på neddelare	17
5.1.6	Provmängder	17
5.2	Utveckling av digital prototyp med simulering	18
5.2.1	Digital konceptutveckling	19
5.2.2	Konceptutvärdering med DEM simulering	20
5.3	Fysisk prototyp	26
6	Diskussion	33
7	Slutsatser och rekommendationer	35
8	Fortsatta studier	37
9	Referenser	38



1 Bakgrund

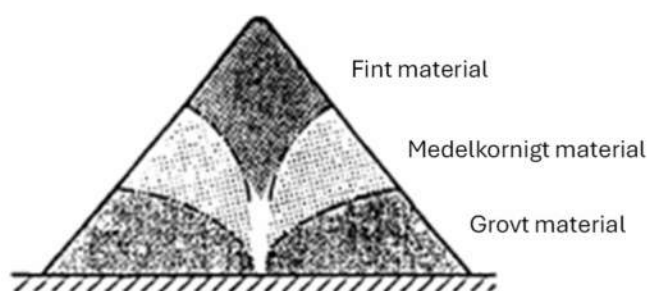
Vid ballastproduktion krossas sprängsalvan i en krossanläggning genom ett antal krossteg med olika krossar. Materialet delas efter det sista krossteget upp i sorteringar (produkter). Vid tillverkningen behöver det säkerställas att rätt produkt framställs. Denna kontroll skall återspegla resultatet av den process som delar upp krossprodukten i de olika sorteringarna. Dessa produkter provtas i samband med en tillverkningskontroll för att säkerställa kvalitén. Det är därmed av största vikt att det prov som tas ut och analyseras, motsvarar den produkt som krossen producerar och definieras i detta fall med en kornstorleksfördelning inklusive så kallade överkorn och underkorn. Anläggningen ställer in krossar och siktar utefter provresultat från laboratorium. Är provet uttaget på ett felaktigt sätt återspeglar inte provresultatet produktens kvalitet och produktionen ställs om i fel riktning och en avvikande produkt tillverkas. Detta kan få stora ekonomiska konsekvenser i form av att produkten kan behöva gå igenom krossprocessen en gång till för att kunna säljas, vilket ökar produktionskostnaden markant, eller behöva säljas som annan produkt till lägre pris. Felaktig produkt kan även riskera att gå ut till kund, med risk för stora ekonomiska konsekvenser i form av viten eller kvalitetsproblem som kan innebära byte av material eller kortare livslängd. Detta är ett branschgemensamt problem som alla tillverkare av krossprodukter brottas med.

Utgångspunkten vid provtagning är, för att få rätt materialfördelning i uttagna prover, att allt separerat material ska undvikas. Allt material som transporterats och sedan omlagrats kommer alltid att bli separerade i olika grad. Av stor vikt är att när ett krossat material skall lagras i upplag, ska upplagen byggas upp på ett sådant sätt som minimerar en materialseparering. Exempelvis bör upplag byggas upp i plan och ej på höjden samt att tippning över kant ej ska ske då det kommer att separera i grövre material vid släntfot. Långa sorteringar har en större separeringstendens än kortare sorteringar. I Figur 1 visas ett exempel på separering i upplag.



Figur 1. Separerat material i 0/90 upplag.

De flesta materialprover för obundna ändamål provtas normalt ur upplag eller i utdragna upplagshögar/provytor, Figur 2.

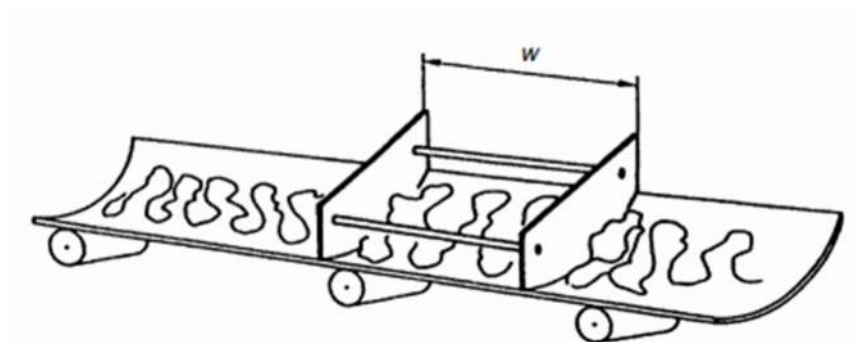


Figur 2. Separerad upplagshög och provtagning i utdragen upplagshög.

Båda dessa fall ger till viss del alltid separerade prover. Att ta ut prover på ett sådant sätt är ett handhavande, vilket medför att resultaten av provtagningen är personberoende. Dessutom sker inte provtagning alltid kopplat tidsmässigt till

produktionen "in time" i dessa fall, vilken är en viktig aspekt vid produktionsstyrning jämfört med om provtagning sker från transportband.

Provtagning på transportband sker genom att en avgränsad del av bandet provtas, Figur 3.



Figur 3. Provtagning på transportband.

En alternativ provtagning är att samla upp material i strålen vid änden av ett transportband. Korrekt uttagna prover blir ej separerade men provet omfattar endast ett kort tidsintervall. Det fungerar också mindre bra för korn med storlekar över 16 mm, för långa sorteringar samt för järnvägs makadam. Dessutom är detta förfaringssätt utifrån arbetsmiljö och ergonomi ej helt säkert eller optimalt.

Det finns därför ett behov av att kunna ta ut prover utan separationer på ett säkert sätt, med en så stor volym att provet representeras av ett större tidsintervall, samt passa de produkter som behöver provtas. Provet som tas ut ska innefatta hela materialflödet taget tills en viss provvolym uppnåtts. Ett sätt att göra detta på är att provta efter strålen direkt ner i en lastmaskinsskopa som förs in under materialstrålen vid bandändan. Den provmängd som kommer att fångas i strålen kommer att bli stor och måste därför delas ned innan provet transporteras till laboratorium för analys. Av största vikt är därför att det prov som tas ut och analyseras neddelas korrekt. Efter neddelning är det viktigt att laboratorieprovet motsvarar det större prov som tas ut i produktionen. Kan detta ske på ett mer automatiserat sätt minskar personberoendet och de prover som inkommer till laboratoriet är alltid uttagna på samma sätt och representerar i högre grad än idag det material som produceras. Det skapas även förutsättningar att alla krossproducenter kan ta ut prover på samma sätt i branschen.

2 Mål och syfte

Målet med projektet är att ta fram underlag för en metodik, som syftar till att kunna utföra en neddelning med en neddelare direkt vid en krossanläggning från ett större produktionsprov till ett laboratorieprov. Detta ska kunna utföras utan att separationer sker samt på ett säkert sätt.

3 Metod

Arbetet med att nå slutmålet att ta fram en fullskalig prototyp sker etappvis i olika delprojekt som bygger på varandra enligt följande:

1. Etapp 1, som genomförs i detta projekt, delas in i två delstapper – a och b. I etapp 1a byggs digitala modeller upp. De digitala modellerna testkörs genom digitala flödessimuleringar. I etapp 1b verifieras resultaten av flödessimuleringarna genom att bygga en fysisk modell av en utvald del och testköra med verkligt material.
2. I kommande etapp 2 justeras de digitala modellerna utefter resultaten från de fysiska försöken i etapp 1 med påföljande flödessimuleringar. Därefter byggs en fysisk prototyp av hela neddelningsprocessen och testkörs med verkligt material. Slutmålet är att en prototyp av en fullskalig neddelare tas fram.

Etapp 1 inleds med en förstudie över olika neddelningsmetodiker som finns i olika branscher. Inspiration hämtas även från neddelningsprocesser i laboratorier samt inledande referensgruppmöte i projektet.

Med detta som utgångspunkt påbörjas en iterativ process där digitala prototyper tas fram och testkörs genom flödessimuleringar genom diskret elementmodellering (DEM). Utifrån resultaten från flödessimuleringarna justeras den digitala prototypen, för att därefter flödessimuleras på nytt i en optimeringsprocess.

En del av den slutligt optimerade digitala prototypen testkörs därefter fysiskt genom en nedskalad fysisk prototyp, som testkörs med olika material. Resultaten av detta tillsammans med tidigare simuleringar ger en grund för kommande etapp 2.

4 Genomförande

4.1 Förstudie

Förstudien inleddes med en workshop i samband med det första referensgruppmötet. Vid workshopen diskuterades bransch erfarenheter av att ta ut korrekta prover samt lösningar man tagit till. I förstudien studerades även olika neddelningsmetoder på laboratorierna samt redde ut om det finns neddelare med liknande kapacitet som projektet är tänkt att ta fram prototyp på. Även liknande tekniker studerades och inspiration hämtades från redan framtagna tekniska lösningar, som sorteringsverk etcetera.

4.2 Digital prototyp

Baserat på förstudien modellerades en digital prototyp upp i skala 1:1. Vald princip för prototypen blev en uppskalad variant av neddelningsapparat, där materialet hålls i ovanifrån och sedan ramlar ner i flera fack som ligger bredvid varandra, vars underliggande kanaler löper varannan åt två olika håll. Åt ena hållet leds materialet ut till en spillhög, åt andra hållet leds materialet vidare ner till nästa uppsättning fack med underliggande kanaler som i sin tur leder bort varannan till spill och så vidare. På så sätt reduceras mängden material med 50% för varje steg i neddelaren, tills en lämplig provmängd återstår. Syftet med projektet är att kunna neddela även större fraktioner som 0-90, vilket förutom att fraktionen i sig kräver större fack och kanaler, också kräver en större mängd ursprungligt material för att få ett representativt utfall. Även om kravställningen på ett 0-32-material är strängare, anses 0-90 vara svårare att provta.

Erforderlig mängd ursprungligt material fastställdes till 500kg, vilket lämpligen hanteras med hjullastare med skopa. Antalet neddelningssteg fastställdes till tre, vilket ger en teoretisk återstående mängd på 62,5kg efter tredje steget. Även 62,5kg är en ansevärd vikt att hantera manuellt, men ytterligare neddelningssteg kan äventyra utfallet gällande fördelning av fraktioner. För hanterbarhetens skull utformades därför prototypens slutliga behållare för provmaterialet i nio olika fack, som vart och ett därmed innehåller cirka 7kg material. Varje fack görs dessutom löstagbart för att kunna tas med till laboratorium eller för att kunna hålla över materialet i annan behållare. Med behållaren blir vikten cirka 9kg vilket är hanterbart att lyfta manuellt. Väl i laboratoriet sammanställs resultatet från de nio behållarna vilket ger ett representativt utfall för den totala provmängden.

Prototypens dimensioner anpassades för att kunna transporteras på väg. Höjd och bredd begränsades för att inklusive transporterande fordon, hållas under 4,5m höjd, och under 2,5m bredd. Framtagna varianter på prototyper håller sig väl under dessa

mått, och är inte större eller tyngre än att de skulle kunna monteras på lämpligt personbilssläp av flatbäddstyp eller motsvarande. Neddelen kan också förses med lyftöglor eller gaffelfack för att enkelt kunna flyttas av hjullastare kortare sträckor inom samma bergtäkt till exempel.

Efter att prototypens utformning fastställts, användes 3D-modellen till att utföra en digital flödessimulering över hur materialet faller och fördelas genom neddelarens steg. Utifrån resultaten, justerades 3D-modellen och en ny simulering gjordes. Denna process upprepades flertalet gånger tills ett tillfredsställande resultat på jämn neddelning uppnåddes. Se kapitel "Resultat" för mer information gällande 3D-modellens olika utformningar och dess påverkan på flödet.

4.3 Digital simulering

Diskret elementmetod (DEM) används för att studera partikelsystem och hur de interagerar med exempelvis maskiner eller omgivande strukturer. Metoden föreslogs av Cundall & Strack (1979) och har sedan dess nått en teknisk mognad för industriellt nyttjande. Metoden har vidareutvecklats vid FCC för beräkning på grafikkort samt med en ny nivå av representation av enskilda partiklars former. Denna kombination ger möjligheten att simulera ett större antal partiklar med mycket god formbeskrivning än tidigare lösningar kunnat erbjuda. Utvecklingen har finansierats genom ett flertal forskningsprojekt.

Separation och segregeringseffekter av bergmaterial vid avlastning från bergflakbil och hjullastarskopa har studerats i SBUF projekt 13638 (Quist, Hunger, & Jareteg, 2019). För att vidare studera effekten av segregering när man kompakterar en bädd av obundet material genomfördes SBUF projekt 13820 (Quist, Bilock, Jareteg, & Persson, 2021). Tidigare forskning vid FCC visar att DEM är en kraftfull metod för utveckling och optimering av maskinsystem som interagerar med bergmaterial. Segregering och separation är en problematisk effekt som uppträder vid i princip all maskinell hantering av bergmaterial. Provtagning och neddelning bör genomföras med en robust och strukturerad metod om signifikansen i provets storleksfördelning skall bibehållas.

Den digitala simuleringen med DEM i det aktuella projektförslaget gick ut på att studera materialflöden för olika digitala prototyper och se om det fanns risk för separation. Olika prototyper framtagna enligt ovan simuleras och jämförs med varandra. De digitala prototyper som är mest lovande, det vill säga skapar minst separerade prover, används som utgångspunkt för att bygga upp fysiska prototyper i nästa etapp.

4.4 Verifiering av flödessimuleringar

I etapp 1b verifierades flödessimuleringarna för utvalda delar av de digitala prototyperna genom fysisk delmodell. Delmodellen byggdes upp och testades genom att använda verkligt material. Materialet provtogs och undersöktes på laboratorium med avseende på kornstorleksfördelning.

5 Resultat (och analys)

5.1 Förstudie

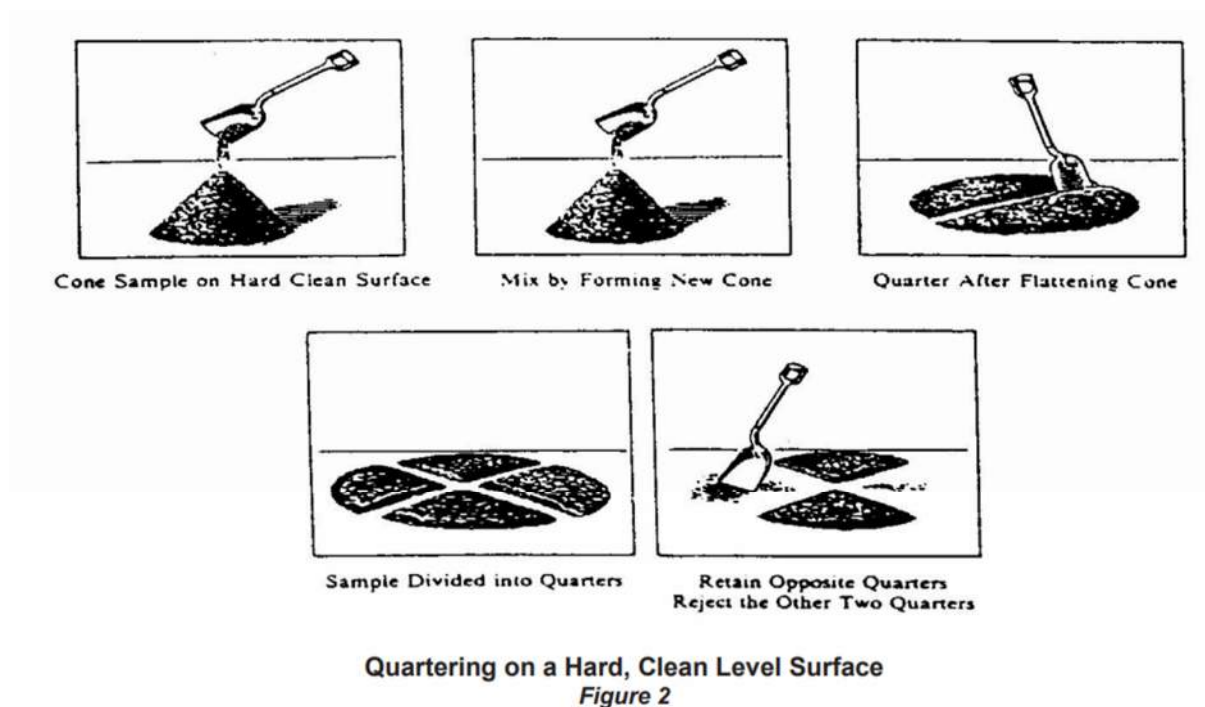
Neddelning av ballastmaterial är vanligt förekommande på laboratorier för att ta ut rätt analysstorlek av det inlämnade provet. Neddelning av materialet till analysprov för laboratorietester beskrivs i svensk och Europa standard EN 932-2 (Svensk Standard, 1999). Det är i standarden beskrivet att nyttja någon av följande metoder för neddelning:

- Kvartering och fraktionsvis skyffling
- neddelningsapparat
- roterande neddelare

De olika metoderna har olika fördelar och nackdelar beroende på provets storleksfördelning och därmed erforderlig provmängd.

5.1.1 Kvartering

För neddelning i fält används kvartering med skyffel på en duk, Figur 4. Metoden har dålig precision och används oftast utan att väga materialet. Metoden används mycket sällan i Sverige och nästan aldrig inomhus i laboratorier. Metoden rekommenderas ej för långa sorteringar, men kan vara lämplig för material med största stenstorlek som är större än vad en neddelningsapparat klarar av.



Figur 4. Genomförande av kvartering prov enligt förfarande beskriven i EN 932-2.

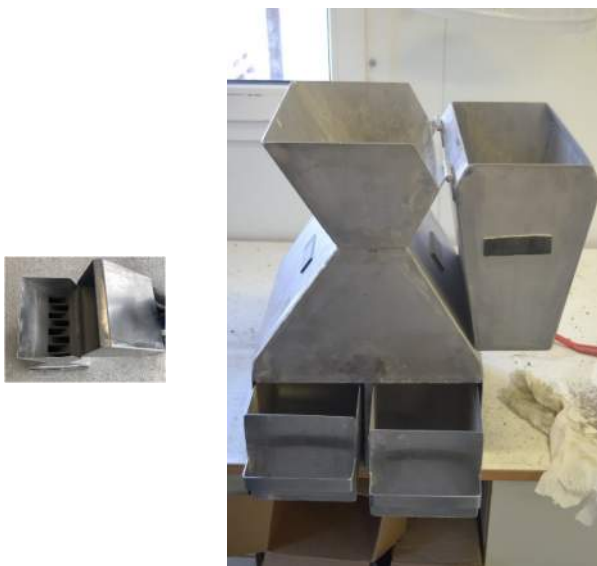
Fraktionsvis skyffling är egentligen ingen neddelningsmetod utan metoden används när ett analysprov skall ha en viss vikt och där vikten anpassas med skyffling av provmaterialet från en större provmängd till analysprovet. Denna metod används när en lämplig spaltneddelare inte finns tillgänglig.

5.1.2 Neddelningsapparat

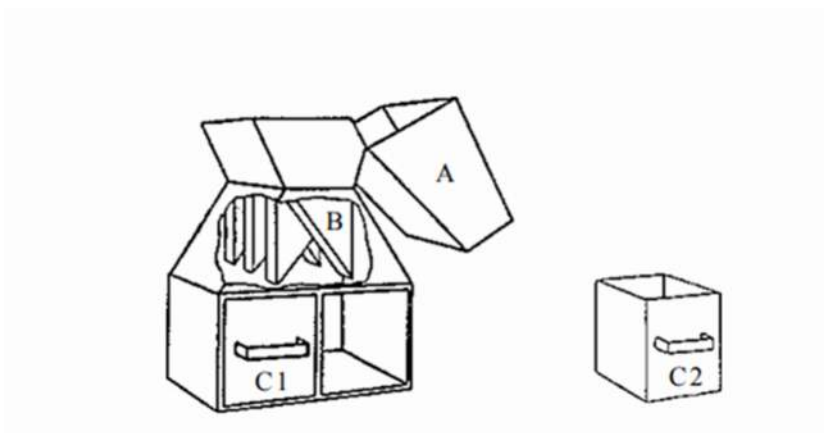
För neddelningsapparat är en sk spaltneddelare den vanligaste neddelningsapparaten, Figur 5, Figur 6 och Figur 7. I den enklaste varianten delas materialet upp i fördelningsrännor med bredd av minst 2 gånger stenmaterialets största kornstorlek. Fördelningsrännorna skall vara multiplar av 2 och minst 8 st. Det från påfyllningskärlet påförda materialet neddelas via fördelningsrännorna till två utdragslådor. Neddelningen görs genom att kassera en av lådornas innehåll och sen ånyo neddela innehållet från den andra lådan i neddelningsapparaten. Proceduren upprepas sedan till det att önskad analysprov erhålls.



Figur 5. Större spaltneddelare med möjlighet att ställa spaltöppning och antal neddelningskanaler.



Figur 6. En vanligt förekommande spaltneddelare med påfyllningskärl till höger.



Figur 7. Neddelningsapparat med tippbart påfyllnadskärl (A), fördelningsrännor (B) samt två utdragslådor (C1 och C2). Efter FAS Metod 207-01.

Med denna metod halveras materialet vid varje steg. Där det är önskvärt att analysprovet skall erhålla en mer precis vikt med liten tolerans, finns det en metodik i EN 932-2 att dela ner till 4 delprover genom två neddelningar och sedan använda 3 av de 4 som ett nytt ursprungsprov och halvera det provet. Även en variant finns beskriven att dela ner till 8 delprov och att sen använda 5 av dessa delprov som ett ursprungsprov som halveras.

Vid hantering av stora provvikter är det mycket tidskrävande att dela ner prov med en liten neddelare. Vid neddelning, är den vikt som ryms i påfyllnadskärlet, den vikt som varje neddelning klarar av. Saknar neddelaren ett påfyllnadskärl är det summan av vikterna i de två utdragslådorna som anger den mängden. Allt provmaterial skall neddelas och materialet skall splittras i två delar och det kan krävas flera neddelningar där de två delarna i varje neddelning sammanslås till två separata delar. En av dessa två delar delas sen vidare. De små neddelningsapparaterna som används på laboratorierna har också en begränsning då bredden på fördelningsrännorna oftast är < 20 mm.

Det finns större neddelningsapparater, se Figur 8, där spaltbredden på fördelningsrännorna går att ställa och större provmängder och provmaterial med större stenstorlekar då kan neddelas. En begränsning hos dessa neddelningsapparater är att antalet fördelningsrännor skall vara minst 8.



Figur 8. Neddelningsapparat modell större.

Det finns även varianter materialet delas ned till 1/4 vid en neddelningsomgång, Figur 9.



Figur 9. Olika varianter för neddelning till 1/4 av ursprungsprov.

Även laboratorieneddelare för neddelning i tre steg till 1/8 av ursprungsprov finns på marknaden, Figur 10.



Figur 10. Neddelning i tre steg till 1/8 av ursprungsprov.

I de fall stenstorleken är större än bredden på fördelningsrännorna hos neddelningsapparaten går det ej att dela ner provet i en neddelare. Sammanfattningsvis gäller generellt för neddelningsapparater:

- Ju fler spalter desto bättre neddelning
- Antalet spalter ska vara lika åt höger och vänster
- Öppningen ska vara tillräckligt stor så att blockering undviks
- Öppningens längd/bredd ska vara 3 gånger stenmax + 5mm
- Materialet skall hållas på i mitten och lika för alla öppningar
- Inget material får komma över kanten
- Spaltbredden på fördelningsrännorna skall vara dubbla stenmax

5.1.3 Rotationsneddelare

Roterande neddelare, Figur 11 används normalt ej för produktionskontroll i ballastbranschen. Där de finns, har de ofta på grund av utrymmeskrävande hantering ej använts flitigt. I en roterande neddelare hålls provmaterialet i en behållare som töms långsamt ner i roterande tårtbitsformade lådor. Neddelaren kan vara utformad med olika antal lådor.



Figur 11. Roterande neddelare.

En roterande neddelare delar bara ned en gång. Det går att anpassa önskat utfall genom att anpassa den påmatade mängden eller att slå ihop materialet från flera neddelningslådor.

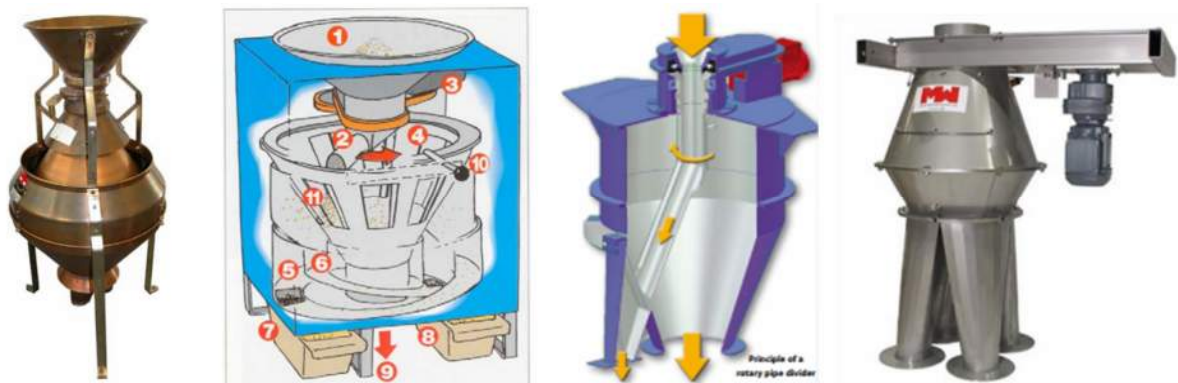
5.1.4 Andra typer av neddelare

En annan neddelningsprincip är lutande plan med så kallad "sample splitter", Figur 12. I denna hälls materialet på uppifrån och materialet delas ner till en sextondel i ett steg. Den benämns även som table sampling.



Figur 12. Lutande neddelare i form av en så kallad "Sample Splitter".

Andra exempel på neddelare visas i Figur 13.



Figur 13. Övriga typer av neddelare/neddelningsprinciper.

5.1.5 Precisionen på neddelare

I en klassisk undersökning (Allen 1993) med ett provmaterial bestående av sand och sockerkorn jämfördes precisionen hos olika neddelningsapparater där kvartering hade den största spridningen följt av table sampling, spaltneddelare och bäst neddelning hade roterande neddelare. I studier med provuttag i ballastproduktionen (Klingberg 2001) gjordes jämförelser med vanlig neddelning och rotationsneddelning där en bättre precision erhöles med användandet av en rotationsneddelare.

5.1.6 Provmängder

De olika neddelningsmetoderna har olika fördelar och nackdelar beroende på provets storleksfördelning och därmed erforderlig provmängd. För grövre material krävs i regel en större provmängd vilket praktiskt är mycket tidskrävande. Eftersom det finns ett befintligt men även ökande behov av kvalitetsprovtagning i täkt är neddelningsoperationen ett utmanande moment.

I produktionen tas samlingsprov ut, som antas vara representativa, och levereras till ett laboratorium för siktanalys. Den övre sorteringssikten benämns med D. I sorteringarna kan och skall det finnas stenar större än D för att uppfylla kravet på gradering i produktstandarden EN 13242. I Sverige görs på inkomna prover på 0/32,0/45,0/63 och 0/90-sorteringar ingen neddelning då de grovsiktas. Dessa prover delas således inte ner på laboratoriet utan grovsiktats oneddelat. Analysprovet siktas då på siktar större än 16 mm och materialen vägs sikt för sikt på siktar $D \geq 16$ mm. Materialet < 16 mm uppsamlas och delas ner till ett analysprov med siktning av 0-16 delen. Behovet idag av neddelningsapparat är således normalt för långa sorteringar med $D > 16$ mm en neddelningsapparat som kan hantera 16 mm stenmax då stenar ≥ 16 mm ej

delas ned. De provmängder som hanteras på analysproverna bestäms i EN 932-1 provtagning och i siktningsstandarden EN 933-1 Tabell 1.

Tabell 1. Minimiprovvikter i kg på analysprov enligt prEN 933-3 och samlingsprovets vikt vid provtagning enligt EN 932-1 vid två antagna löst packade skrymdensiteter. Vikt för siktning med D 45 och 63 mm har för prEN 933-1 beräknats utifrån formel $M = (D/10)^2$

	Siktning	Provtagning	
Övre Stenmax D, mm	Provvikt, kg EN 933-1	Samplingsprovets vikt EN 932-1 i kg	
		Vid lös skrymdensitet enl. prEN 1097-3	
	Vikt M kg	1,3 Mg/m ³	1,5 Mg/m ³
90	80	64,9	69,7
63	64	54,3	58,3
45	20	45,9	49,3
31,5	10	38,4	41,2
16	2,6	27,4	29,4

Minimivikten för siktning av prov med D 31,5 mm är i EN 933-1 10 kilo. Minimivikten på provtaget samlingsprov enligt EN 932-1 är dock kring 40 kilo se Tabell 2. Allt material grovsiktas och ett samlingsprov 0/32 material skall normalt vara drygt 40 kilo.

Den neddelningsapparat som utvärderas i detta projekt delar ner allt material utan en inledande grovsiktning. Önskvärt är att provet efter en neddelning ger ett analysprov som dels uppfyller minimivikten för siktningsanalys men dessutom vikten för ett tänkt neddelat samlingsprov. För grövre sorteringar skall dock den vikten anpassas uppåt så den också uppfyller kravet i siktningsstandarden EN 933-1 på minimianalysprovsvikt. Allt material grovsiktas och därför är det i praktiken önskvärt att analysprov efter en neddelning på ett 0/32 material skall vara minst 45 kilo.

Tabell 2. Föreslagna minimivikter på analysprov efter neddelning i stor neddelare.

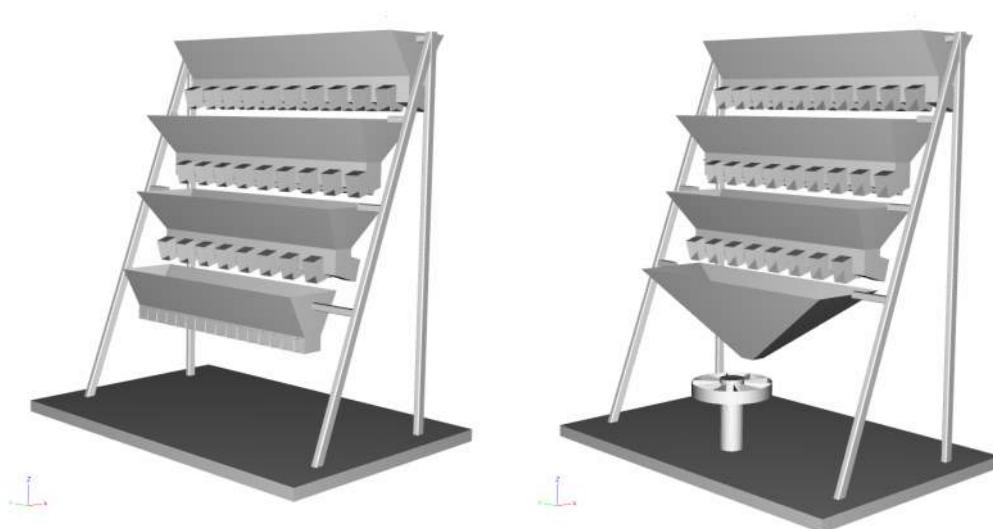
D, mm	Vikt kg
90	85
63	65
45	50
31,5	45

5.2 Utveckling av digital prototyp med simulering

I detta avsnitt redovisas den iterativa konceptutveckling som genomförts samt de simuleringsstudier som legat till grund för konstruktionstekniska beslut. Slutligen visas resultatet för simulering av den sista iterationen som benämns koncept 5.

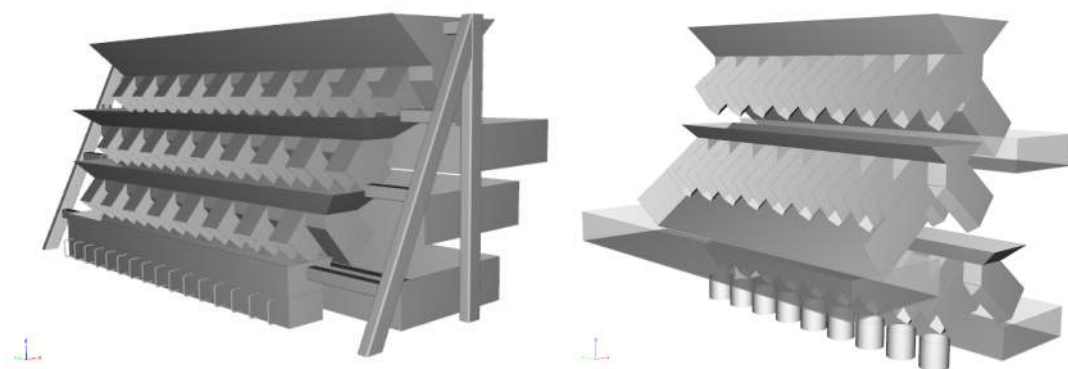
5.2.1 Digital konceptutveckling

Vid en första konstruktionsiteration utvecklades tre olika koncept. I Figur 14 ses illustrationer av koncept 1 och 3. Den övergripande konstruktionsprincipen bygger på neddelning från hjullastarskopa i tre delsteg till ett slutgiltigt provuttag. De två koncepten skiljer sig gällande hur den slutgiltiga provuppdelningen sker. Koncept 2 är en variant på koncept 3, och eftersom inledande simuleringar visade att konceptet för koncept 2 ej var framgångsrikt så genomfördes ej vidare simuleringar av det konceptet och utelämnas därmed här.



Figur 14. Illustration av CAD-geometri för koncept 1 (till vänster) och koncept 3 (till höger).

I den andra konstruktionsiterationen drogs slutsatser (se avsnitt 5.2.2) från simuleringsutvärderingen. Detta resulterade i förändringar och framtagningen av koncept 4 och därefter en tredje konstruktionsiteration till koncept 5, se Figur 15.

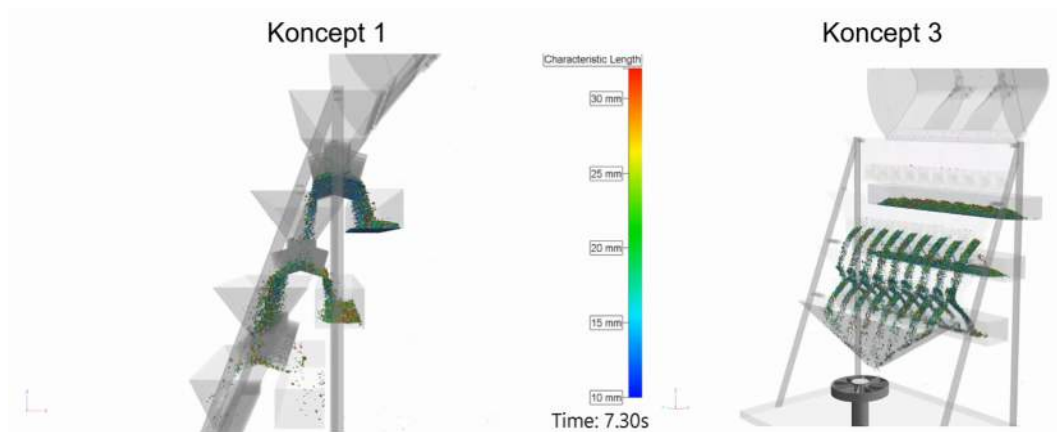


Figur 15. Illustration av CAD-geometri för koncept 4 (till vänster) och koncept 5 (till höger).

5.2.2 Konceptutvärdering med DEM simulering

I Figur 16 visas bilder från simulering av de första två koncepten (1 och 3). Från dessa flödessimuleringar kunde följande slutsatser dras:

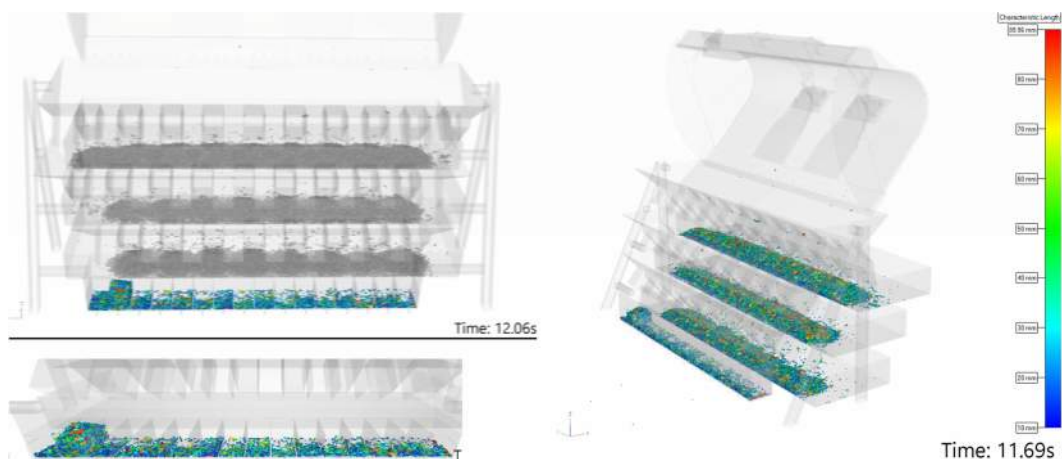
- Lutningen på kanalernas glidytor var för låg vilket gjorde att en stor mängd material blev kvar i systemet.
- Principen i koncept 3 att sampla ihop materialet på slutet och statiskt leda ner flödet på ett roterande bord fungerade inte. Roterande neddelning kräver principiellt konstant massflöde vilket ej kan åstadkommas vid dynamiska flöden.
- På grund av konfigurationen med delningskanaler blev ej neddelningen helt jämn med avseende på provmassa.



Figur 16. Illustration av DEM-simulering av koncept 1 (till vänster) och koncept 3 (till höger).

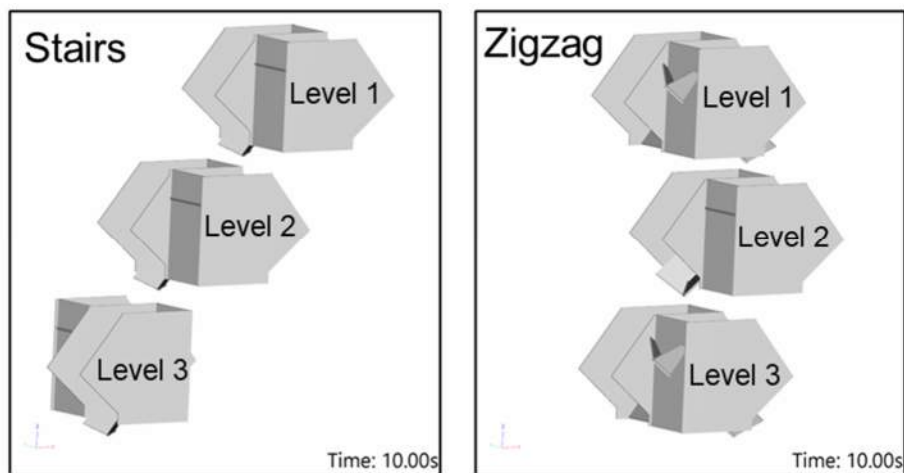
Baserat på dessa slutsatser beslutades att koncept 1 skulle vidareutvecklas.

Koncept 4 och simuleringsresultat visas i Figur 17. Som visas i bilden uppkommer en flödeseffekt som gör att material ackumuleras i provlåda 2 från vänster. Vid mer detaljerad analys insågs att man ej kan ha ett minskat antal kanaler i efterkommande delningssteg. När man reducerar antalet kanaler skapas effekter som gör att varje delning inte blir 50% delnings-ratio, utan istället en sammanslagning av flöden. Detta resulterar i mer material i vissa provlådor och en felaktig neddelning.

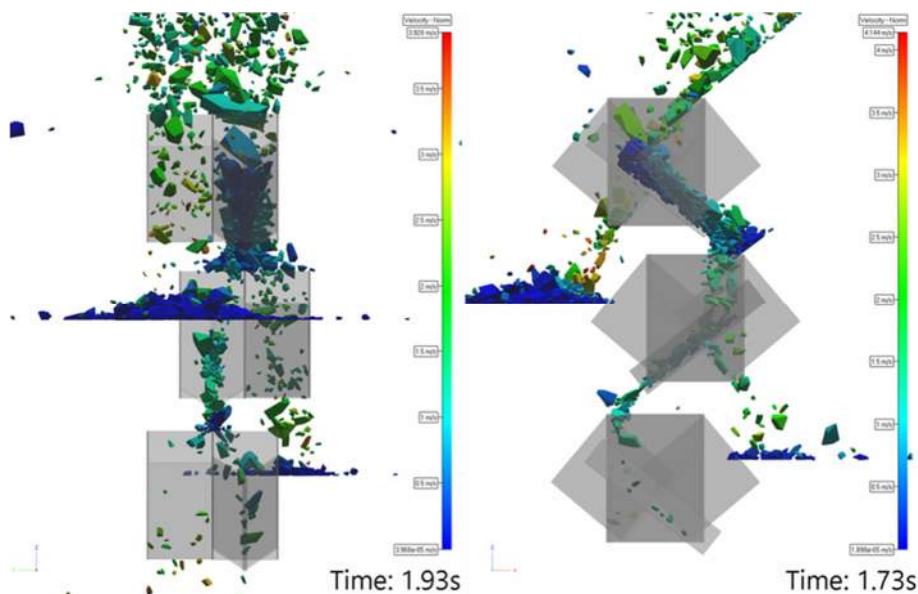


Figur 17. Simuleringsresultat för koncept 4.

Från konstruktionsiteration 2 (koncept 4) insågs att det principiella neddelningsförfarandet behövde utvärderas mer grundläggande. Därför skapades två varianter av enhetsceller, se Figur 18, där den isolerade neddelningsprocessen kunde studeras. Exempel på dessa simuleringar ses i Figur 19.



Figur 18. Schematisk illustration av principiell enhetscell för neddelning. Till vänster med trappstegsprincip och till höger med sick-sack princip.



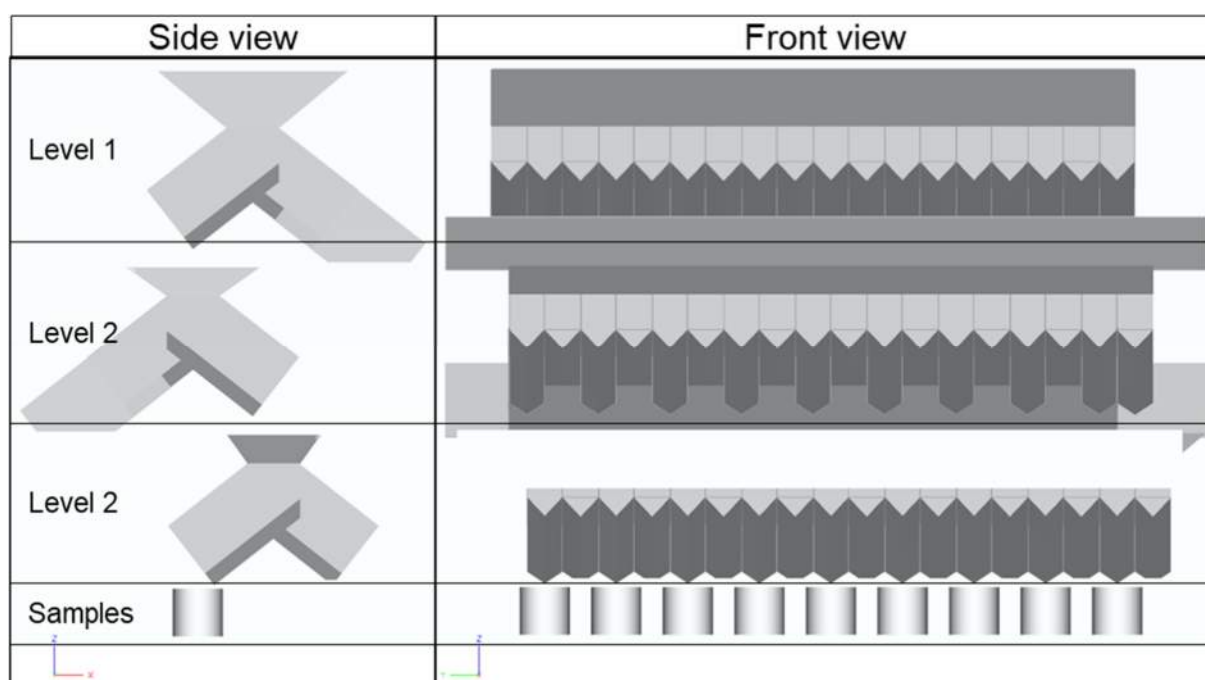
Figur 19. Simuleringsresultat för utvärderings med enskilda enhetsceller.

Med hjälp av simulering av parametriserade enhetsceller togs lämpliga vinklar och dimensioner fram. En slutsats var att flödet måste flöda växelvis och vända håll. Om detta inte sker, vilket utvärderades i vänstra bilden i Figur 18, får materialet en för hög hastighet. Detta påverkar delningsbeteendet negativt. En ytterligare slutsats var att varje efterkommande delningssteg skall ha en (1) ytterligare kanal så att mitt-plåten för kommande kanal alltid ligger i mitten på inkommande kanal. En tredje insikt var att kanalerna måste vara V-formade för att centrera flödet. Annars kan materialet flöda i kanten på en kanal och skapa en ofördelaktig massdelning i kommande steg. Dessa design-principer samt förslag på dimensioner sammanfattades i Tabell 3 och var ingångsvärdet till slutliga koncept 5.

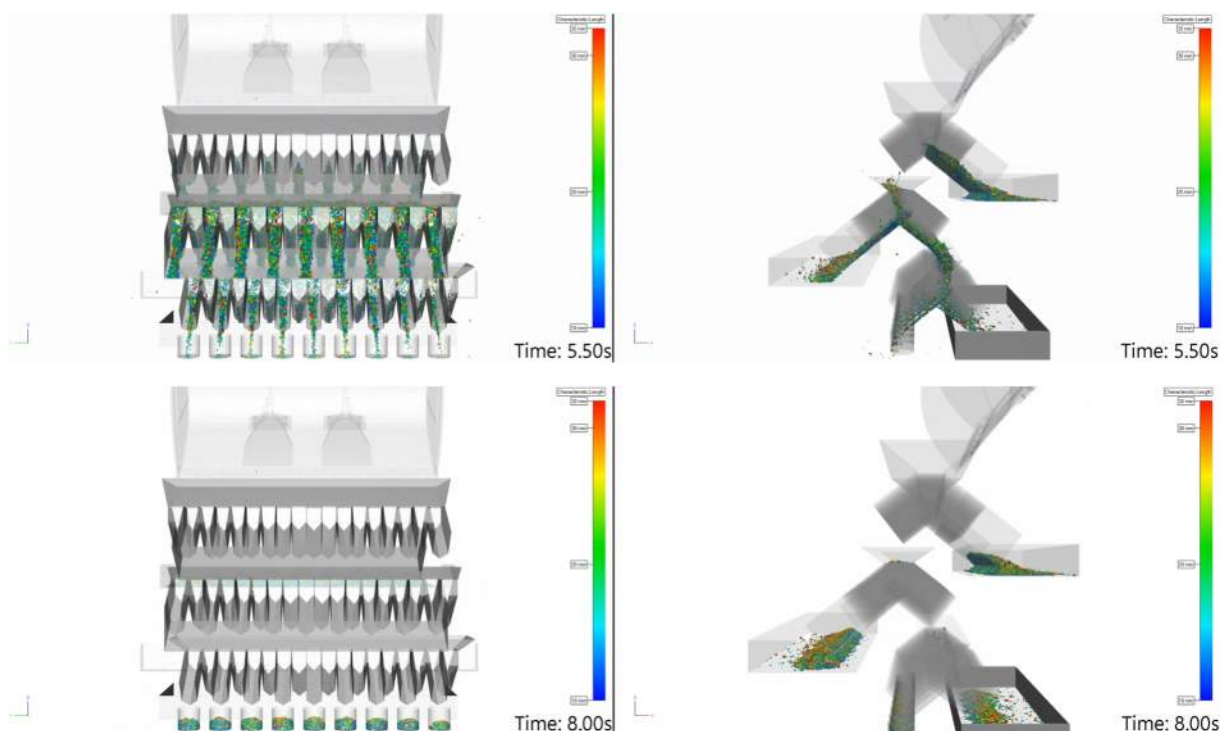
Tabell 3. Designriktlinjer framtagna med simulering med enhetsceller.

#	Riktlinje	Variabel	Min	Nom.	Max	Enhet
R01	Lutningsvinkel för glidplan delningssektion	x_1		38		[deg]
R02	Lutningsvinkel för V profil i glidplan	x_2		100		[deg]
R03	Bredd för delningssektion	x_3		180		[mm]
R04	Vertikalt avstånd mellan delningssektioner	x_4		246		[mm]
R05	Horisontellt avstånd mellan delningssektioner vid växelvis design	x_5		134		[mm]
R06	Höjd för delningsplåt från glidplanets högsta position	x_6		184		[mm]
R07	Vertikal höjd glidplan	x_7		392		[mm]
P01	Delningssektionerna skall operera med växelvis neddelning till höger och vänster för att bryta partikelströmmens momentum. Detta ger jämnare massfördelning i varje delningssektion samt i slutliga provlådor.					
P02	Varje delningssteg skall ha EN (1) ytterligare delningssektion än föregående delningssteg. Detta säkerställer att varje partikelström delas 50/50 och inte felaktigt slås samman.					
P03	Slutligt prov samlas förslagsvis upp direkt i provhinkar med passande utlopp från sista delningssteget.					
P04	Ytan där provhinkar placeras behöver vara enkel att rengöra med tryckluft eller borste.					
P05	Förslagsvis konstrueras varje delningssektion modulärt och skruvas ihop					

Med hjälp av riktlinjer för design utvecklades koncept 5, se Figur 20. Exempel på simuleringsresultat kan ses i Figur 21. Generellt fungerar neddelningen och flödet mycket bra i detta koncept med relativt låga fel i delningen vilket ses i Tabell 4.



Figur 20. Illustration av slutligt koncept med sido-vy och front-vy.

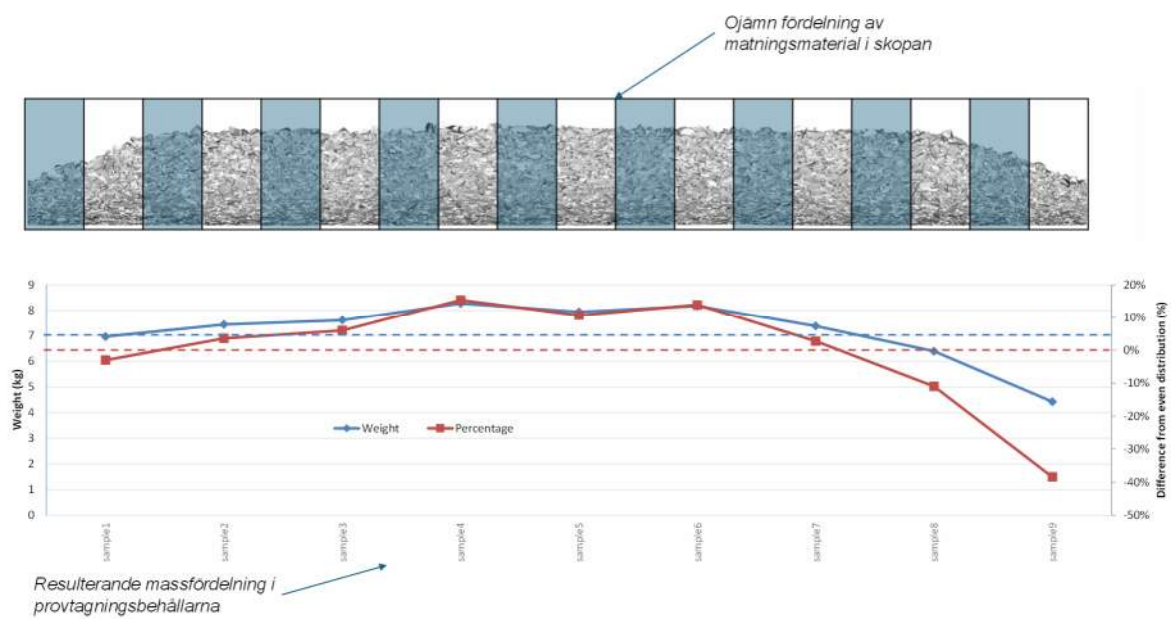


Figur 21. Exempelvyer från simulering av koncept 5 under flödesförloppet i de övre bilderna och vid slutligt tillstånd i de nedre bilderna..

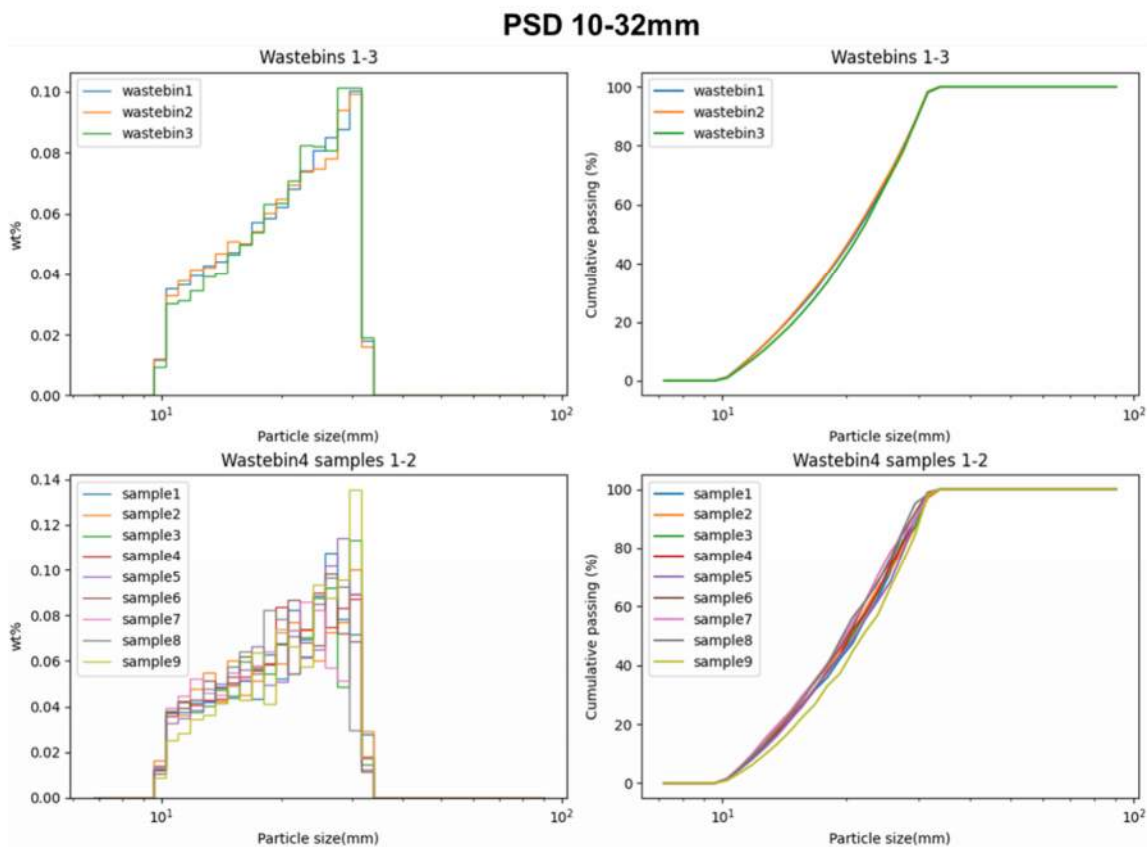
Tabell 4. Resultat för delnings-split i de olika delningsnivåerna för simulering med +10/-32 och +10/-90..

PSD 10-32mm			PSD 10-90mm		
Prov	Waste		Prov	Waste	
Level 1	49.66%	50.34%	Level 1	49.51%	50.49%
Level 2	50.64%	49.36%	Level 2	51.47%	48.53%
Level 3	48.32%	51.68%	Level 3	47.21%	52.79%

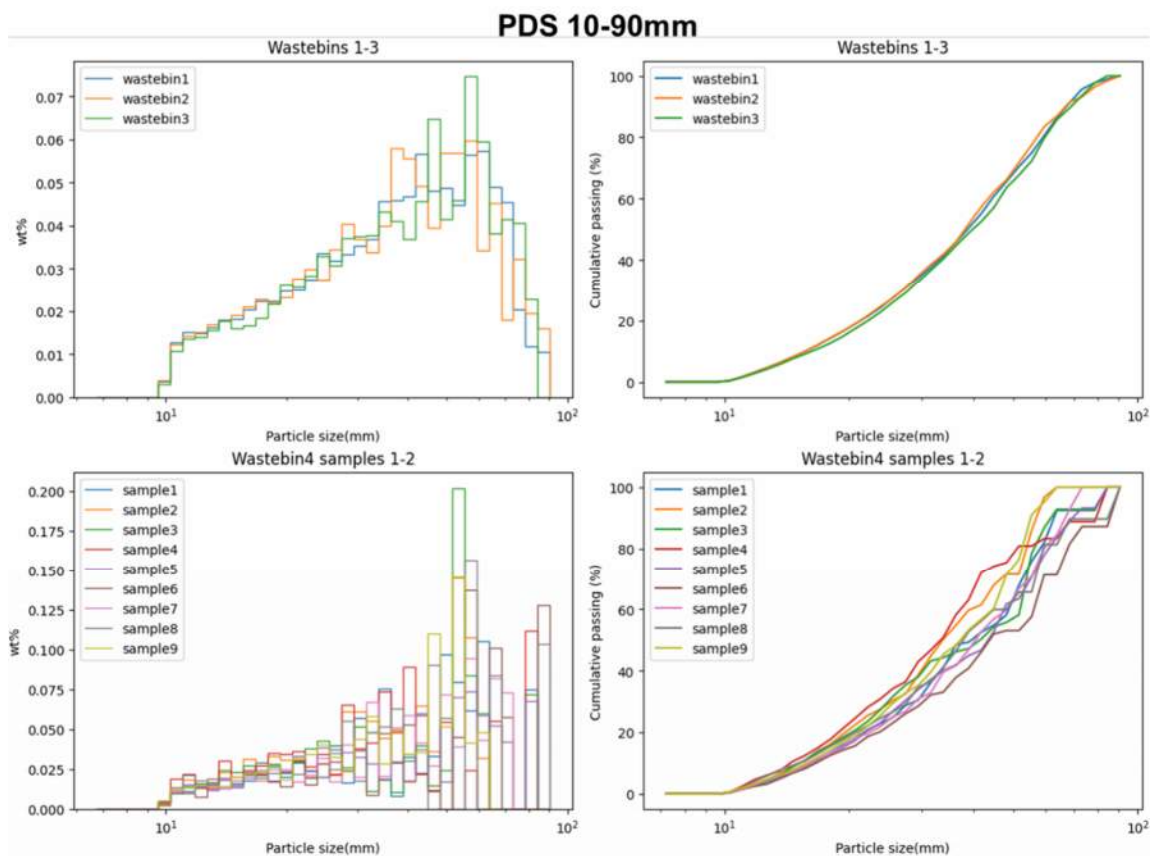
I Figur 22 visas resultatet av neddelningen med avseende på provmassa i respektive provlåda för +10/-32 fraktionen. En viss ojämnheter i fördelningen av massa i provlådorna upptäcktes vid analys. Det visade sig att massfördelningen i hjullastarskopen ej var helt jämn. En viss ojämnheter i massfördelning behöver ej vara ett problem då storleksfördelningen är viktigare. Dock bör det beaktas i kommande utveckling att jämn fördelning i skopen är att föredra. I Figur 23 och Figur 24 visas storleksfördelningsanalysen för +10/-32 fraktionen respektive +10/-90mm fraktionen. Skillnaderna mellan provlådorna för +10/-32mm fraktionen är små. För +10/-90 kan man se en viss varians (nedre högra delen av Figur 24. Detta är dock den naturliga varians som alltid uppträder som konsekvens av låg provmängd för en så grov fördelning. Det viktiga är att fördelningen för alla provlådor sammantaget är representativ för populationens fördelning (övre högra delen av Figur 24).



Figur 22. Massfördelning i provlådor för simulering med +10/-32mm storleksfördelning.



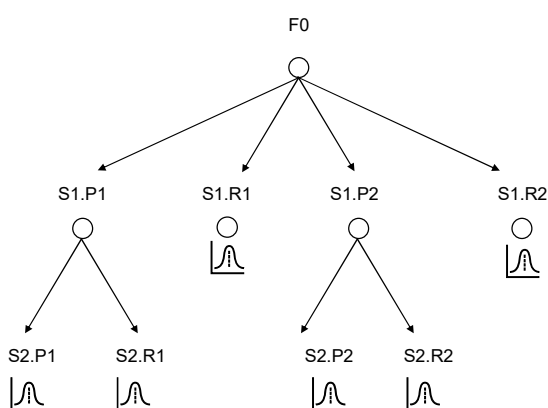
Figur 23. Resultat med avseende på storleksfördelning för simulering med fraktion +10/-32mm. Till vänster överst visas frekvensen för olika kornstorlekar för de bortsorterade materialen för respektive neddelningssteg. Till vänster nederst visas frekvensen för olika kornstorlekar för varje provlåda. Till höger överst visas kornstorleksfördelningen för de bortsorterade material för respektive neddelningssteg. Till höger nederst visas kornstorleksfördelningen för varje provlåda.



Figur 24. Resultat med avseende på storleksfördelning för simulering med fraktion +10/-90mm. Till vänster överst visas frekvensen för olika kornstorlekar för de bortsorterade materialen för respektive neddelningssteg. Till vänster nederst visas frekvensen för olika kornstorlekar för varje provlåda. Till höger överst visas kornstorleksfördelningen för de bortsorterade material för respektive neddelningssteg. Till höger nederst visas kornstorleksfördelningen för varje provlåda.

5.3 Fysisk prototyp

Baserat på simuleringsresultaten av koncept 5, utvecklades en nerskalad fysisk prototyp för verifiering. En fullskalig prototyp vore att föredra, dock var det ej rimligt ur ett kostnads och tids-perspektiv i aktuellt projekt. Den fysiska prototypen konstruerades med fyra ingående kanaler, och det principiella delnings-schemat visas i Figur 25. F0 symboliserar utgångsprovet som ska delas ned, S1.P1 respektive S1.P2 är materialflöden för fortsatt neddelning och S1.R1 respektive S1.R2 är bortsorterade material efter första neddelningssteget. S2.P1 respektive S2.P2 är prover som tas ut för analys. S2.R1 och S2.R2 är bortsorterade prover efter andra neddelningssteget. För varje fysiskt försök analyserades viktfördelning och kornstorleksfördelning på S1.R1, S1.R2, S2.R1, S2.R2 samt S2.P1 och S2.P2.



Figur 25. Schematisk illustration av neddelningsprototypens delningsprincip.

En provserie genomfördes vid Skanskas laboratorium i Gunnilse. Tre olika material testades med fem repetitioner. I Figur 26 visas de tre materialen i den provplåt som modifieras att representera hjullastarskopen. Bilder på prototypen från tre olika vyer ses i Figur 27. Provburkar placerades för att fånga upp materialströmmarna. För att undvika spill nyttjades pappersark som guidande väggar. Ett kamerasystem med Sony RX0 kameror användes för synkroniserad filmning av varje delningstest. Efter varje test vägdes de olika delproven samt märktes för siktanalys.

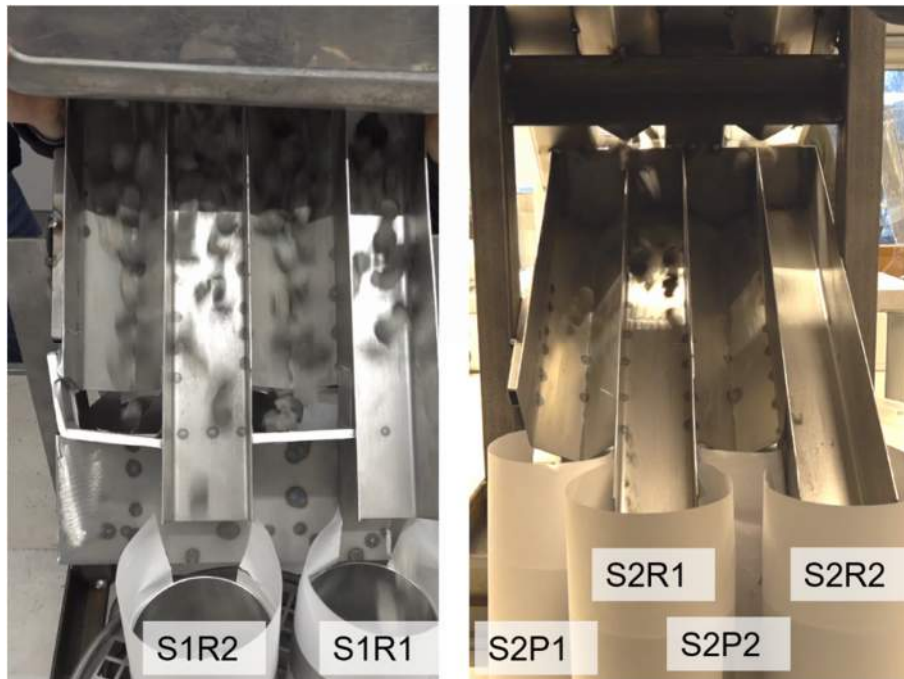


Figur 26. Bild på provmaterial för neddelningsförsök. T.v. +8/-17mm, mitten +4/-16, t.h. +0/-16mm.



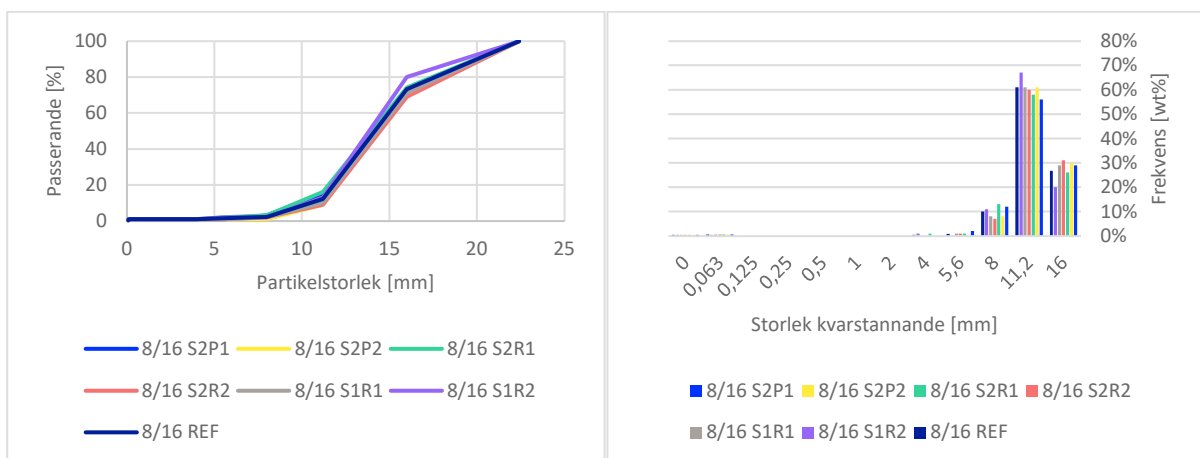
Figur 27. Bilder på neddelningsprototypen från experiment genomförda vid Skanska Gunnilse.

I Figur 28 visas materialflöden från ett av försöken på +8/16 materialet. Allt material med få undantag hamnade i respektive uppsamlingsburk.



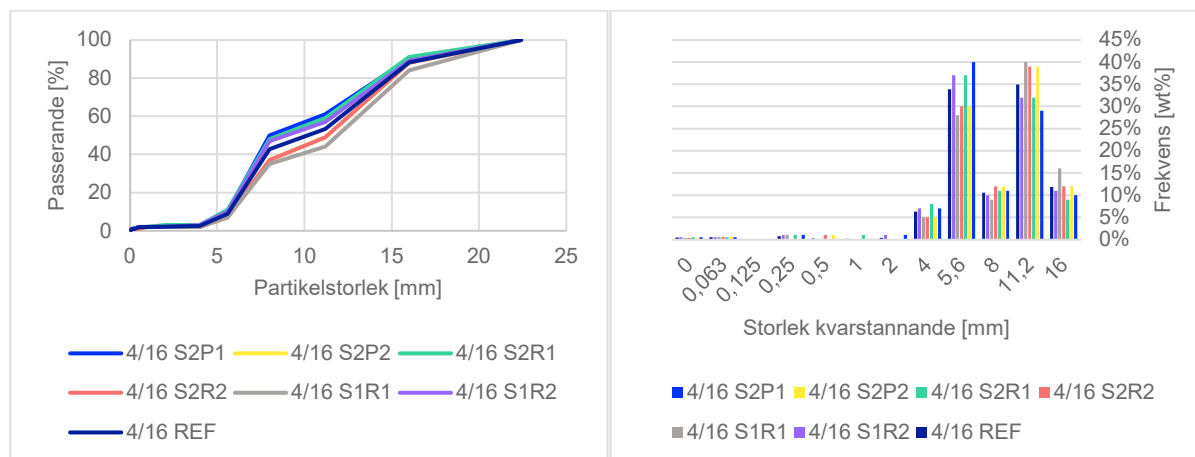
Figur 28. Bild från video av neddelningsförsök för +8/-16 fraktion.

I Figur 29 redovisas kornstorleksfördelningen samt frekvens för varje kornstorlek för material +8/16 mm.



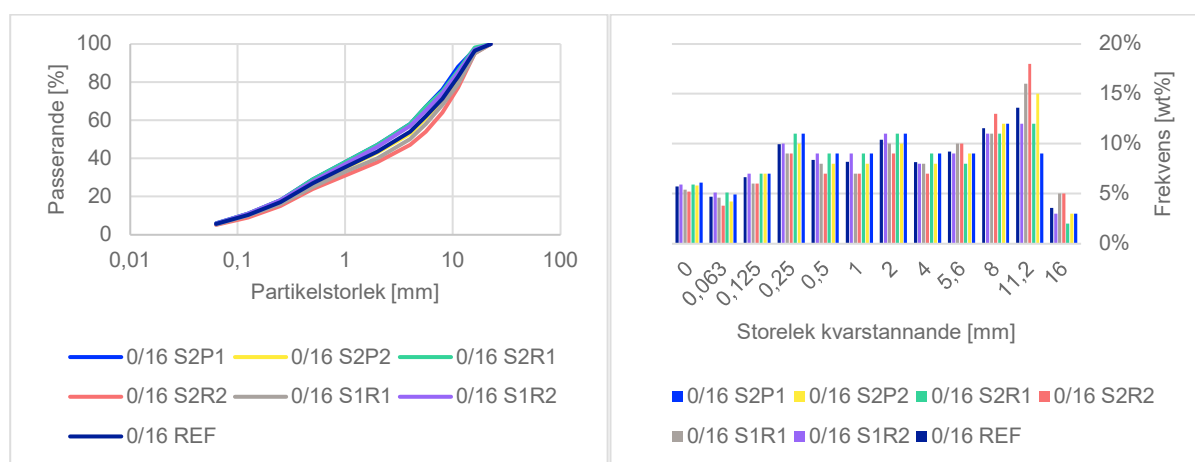
Figur 29. Storleksfördelningsanalys för delningsprov fraktion +8/-16mm.

Kornstorleksfördelningen för materialen i respektive uppsamlingskärl är förhållandevis likartade och följer simuleringsresultaten redovisade i Figur 23. I Figur 30 redovisas kornstorleksfördelningen samt frekvens för varje kornstorlek för material +4/16 mm.



Figur 30. Storleksfördelningsanalys för delningsprov fraktion +4/-16mm.

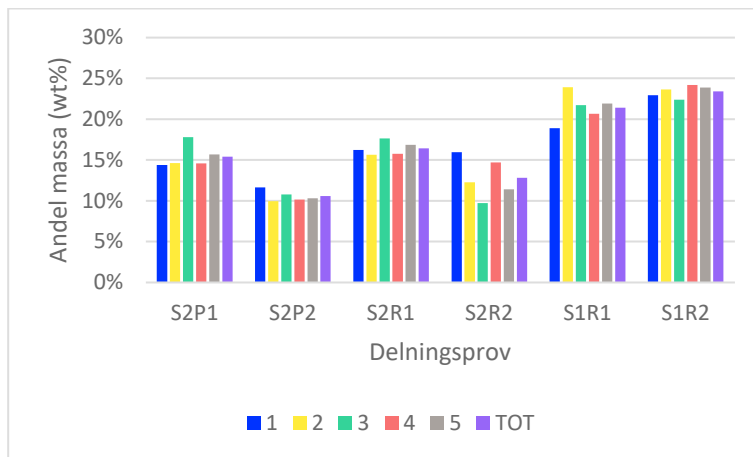
Här var skillnaderna i kornstorleksfördelningen mellan materialen i de olika provburkarna något större men följer fortfarande tendensen från simuleringen. I Figur 31 redovisas kornstorleksfördelningen samt frekvens för varje kornstorlek för material +0/16 mm.



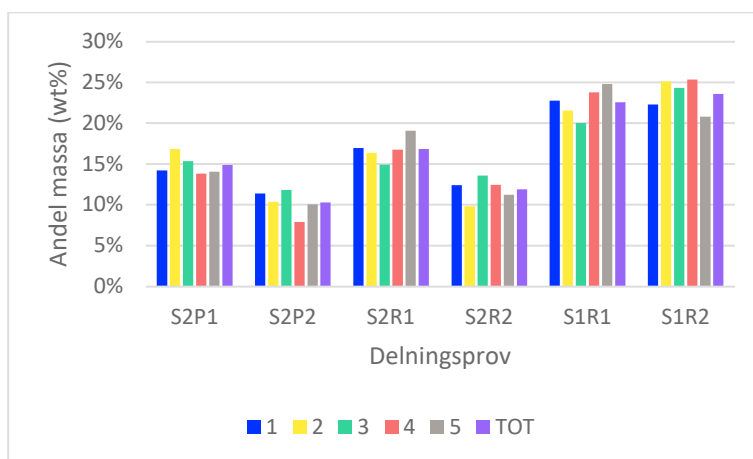
Figur 31. Storleksfördelningsanalys för delningsprov fraktion +0/-16mm.

Här var skillnaderna i kornstorleksfördelningen mellan materialen i de olika provburkarna något större jämfört med +8/16 materialet men något mindre jämfört med +4/16 materialet. Skillnaderna följer fortfarande tendensen från simuleringen.

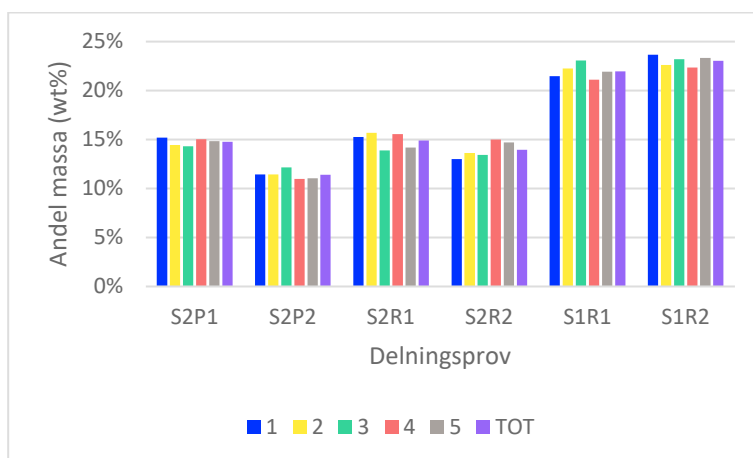
I Figur 32, Figur 33 och Figur 34 redovisas provmängderna för respektive delprov för material +8/16, +4/16 respektive +0/16.



Figur 32. Provmängder för respektive delningsprov samt testrepetition 1-5 för +8/-16mm.

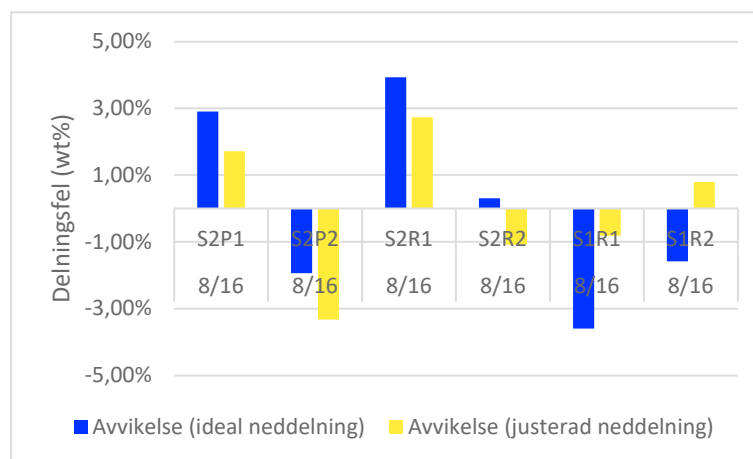


Figur 33. Provmängder för respektive delningsprov samt testrepetition 1-5 för +4/-16mm.

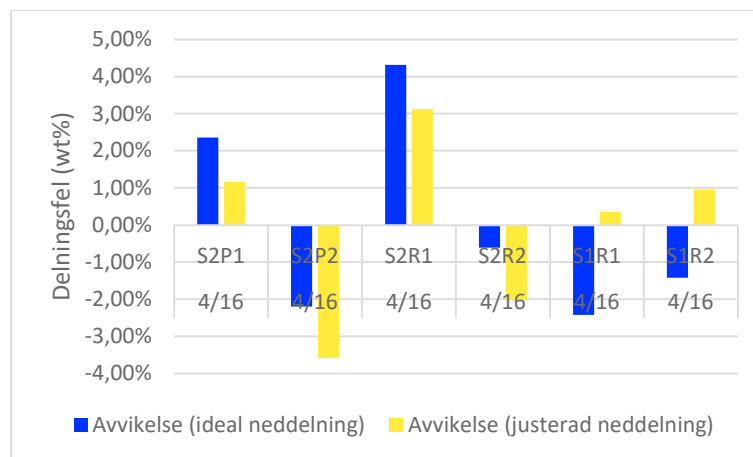


Figur 34. Provmängder för respektive delningsprov samt testrepetition 1-5 för +0/-16mm.

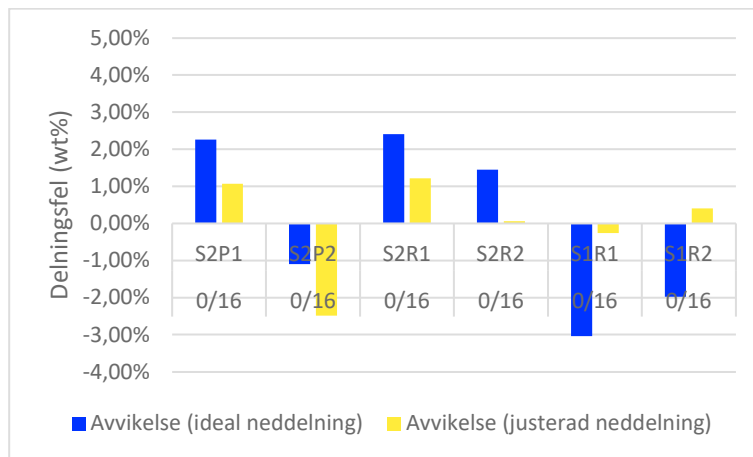
En systematisk skillnad kan skönjas att då vissa provburkar erhöill mer respektive mindre material än vad som är förväntat vid en tänkt 50/50 fördelning efter varje neddelningssteg för respektive flödesränna. Det visade sig att den fysiska prototypen var till vis del felbyggd med avvikande mått på rännornas bredd. En bredare ränna vid första neddelningssteget medför att mer material har möjlighet att hamna där. På grund av detta justerades resultaten och i Figur 35, Figur 36 och Figur 37 redovisas avvikelser från ideal (förväntad) provmängd före och efter justering för material +8/16, +4/16 respektive +0/16.



Figur 35. Avvikelse från ideal samt justerad neddelning för +8/-16mm provet.



Figur 36. Avvikelse från ideal samt justerad neddelning för +4/-16mm provet.

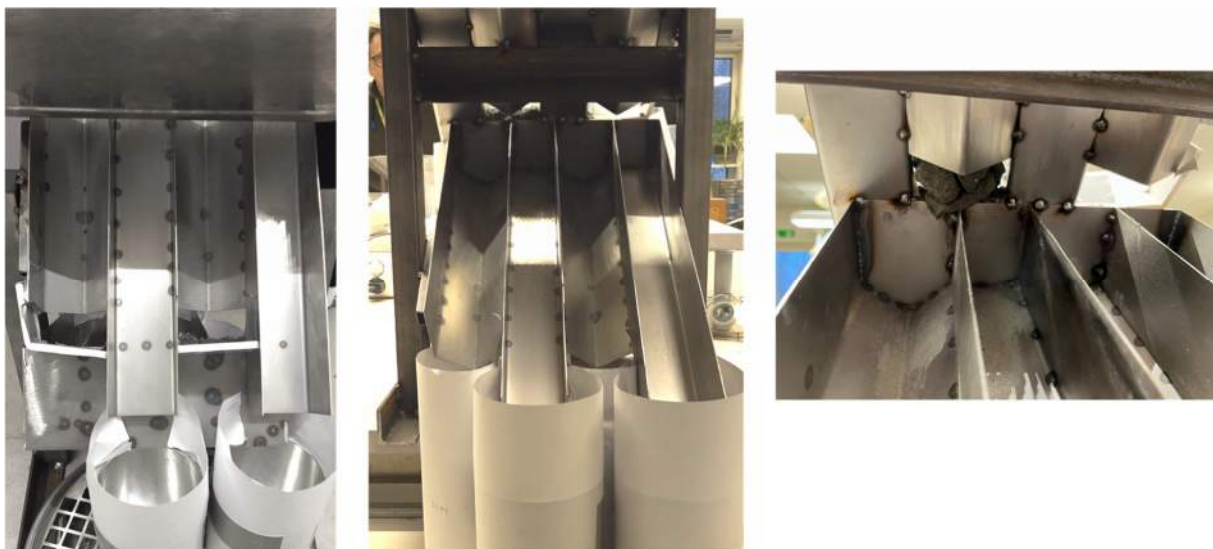


Figur 37. Avvikelse från ideal samt justerad neddelning för +0/-16mm provet.

Avvikelserna från förväntad viktfördelning blev något mindre efter justeringen men fortfarande kan en viss systematik skönjas. Viktavvikelserna är däremot i samma nivå som simuleringsresultaten redovisade i Tabell 4.

Vid försöken med +0/16 materialet, var detta något fuktigt, vilket gjorde att finmaterialet fastade på varje ränna och var manuellt tvunget att skaka och skrapas ned till rätt provburk.

Då den nedskalade fysiska prototypen var anpassad för att klara material upp till +0/32 mm gjordes ett försök att studera om det fanns någon blockeringsrisk. Resultaten redovisade i Figur 38 visar på att blockeringsrisken var stor.



Figur 38. Blockering vid neddelning av grovkornigt material.

6 Diskussion

De digitala simuleringarna visar att neddelarens layout och geometri har en betydande inverkan på flödet och viktfördelningen. Till exempel så visade sig placering av neddelarens steg i en sick-sack layout ge ett bättre resultat än en trapp-layout. Detta kan bero på att allt material, både spill och prov, får motsvarande rörelsemönster och hastigheter med riktningsändringar mellan de olika stegen vid sick-sack-utformning. Avstånd mellan de olika stegen med avseende på fallhöjd och förskjutning horisontellt inverkar också, där viss geometri verkar vara gynnsammare för att alla fraktioner ska flöda på ett likvärdigt sätt. Vidare visade det sig att rännornas utformning också har en inverkan, där en V-formad botten ger ett bättre resultat. Detta kan bero på att flödet styrs mer mot mitten av rännan, och på så sätt blir materialet centrerat mot delningsplåten för nästa stegs två underliggande rännor.

Det framtagna koncept 5 visar på att det går att få till en neddelning som är jämn viktfördelningsmässigt och med liten variation i kornstorleksfördelning, vilket var utvecklingsprojektets huvudsyfte. Dock visar simuleringensresultaten på en naturlig variation som är större ju större maximal kornstorlek är i förhållande till provmängd/materialmängd. Det blir helt enkelt mer slumpartat var de få större partiklarna hamnar i respektive "provbehållare". Detta är även att förvänta i verkligheten och de rekommenderade provvikterna och analysvikterna baseras ju på detta.

Den fysiska prototypen hade en viss breddskillnad i facken, där en något mindre andel av materialet gick till provet och resten gick till spill. Denna breddskillnad stod i direkt korrelation med vikten på provet i jämförelse med vikten på spillet. Vid kompensation för breddskillnaden, visar resultatet att fördelningen förvisso fortfarande skiljer sig några viktprocentenheter, men att skillnaden stämmer väl mot den naturliga variation i fördelning som också simuleringarna visar. Andra faktorer som påverkade dessa resultat kan vara vikten av att nederdelen av den V-formade rännan hamnar mitt över underliggande fördelningsplåt för nästa delningssteg. Här krävs stor precision i konstruktionsarbetet. Materialfördelningen i "påfyllnadsskopen" spelar också roll liksom hur själva "tippningen" av materialet gick till. Det är också viktigt att material är oseparatorat vid själva tömningen. Antalet kanaler för den fysiska prototypen var även begränsat till 4 för varje neddelningssteg, vilket kan ha skapat randeffekter, som suddas ut med en prototyp i fullskala.

Vid försök med +0/16-material visade det sig att fuktigt 0-material fastnade i rännorna och fick vibreras och skrapas ned i respektive provbehållare. Detta är något som sannolikt kommer att inträffa i en fullstor neddelare också och något att ta hänsyn till vid fortsatt konceptutveckling. Ett sätt att åtgärda problemet är att komplettera neddelaren med ett slags vibreringssystem. Det är emellertid också önskvärt att neddelaren är så "mekanisk" som möjligt utan några elektiska komponenter.

Även bredden på flödeskanalerna samt avståndet i höjdlid mellan varje neddelningssteg behöver anpassas bättre till maximal kornstorlek. Den fysiska prototypen var anpassad till +0/32 men blockering uppstod ändå. Om materialet innehåller för stora stenar eller korn kommer det att bli stopp i neddelningsrännorna. En sortering skall normalt inte innehålla stenar större än 1,4 gånger stora D på sorteringen. Det är en absolut gräns på 2 D men den uppnås aldrig i praktiken. Det kan ändå inträffa att neddelning önskas göras på ett grovt material med okänt stenmax. Som en säkerhetsåtgärd borde en fullskaleneddelare utrustas med en övre tvärställd harpsikt som tar bort eventuell stor sten om neddelning av prov med D nära en satt gräns. En begränsning kan även finnas i grova material som är väldigt avlånga att de tvärställer sig inne i neddelningsapparaten.

Den fysiska prototypen tillverkades i nedskalad version vilket kan påverka resultatet. Testernas resultat visar dock stor likhet med resultaten från flödesanalyserna med den fullskaliga digitala prototypen. Men för att slutligen fastställa effekterna fullt ut av en nedskalning, behöver resultaten jämföras med en fullstor neddelare.

7 Slutsatser och rekommendationer

Följande slutsatser kan dras från resultat och diskussion:

- Metodiken att ta fram digitala koncept som simuleras och verifieras i fysisk prototyp har fungerat väl och uppfyllt projektmålen.
- Studierna med simuleringarna har visat att det är möjligt att konstruera en neddelare som tillfredsställande kan utföra en acceptabel neddelning till analysprov både med avseende på viktfördelning och kornstorleksfördelning
- Ska neddelning ske i fler steg i en och samma neddelningsapparat är det viktigt att bryta flödet med att byta håll på materialflödet för att få en jämnare viktfördelning
- Det är viktigt att antalet kanaler ökas för varje neddelningssteg för att möjliggöra en jämn fördelning även i ytterkanterna av neddelningsapparaten
- Det är viktigt att bygga V-formade kanaler för att styra flödet över nästkommande neddelningsstegs fördelningsplåt
- Både resultat från simuleringar och fysiska försök visar på att en naturlig variation i kornstorlek är att förvänta och speciellt för grova sorteringar i förhållande till liten provmängd (det är mer slumpartat var få enskilda korn placerar sig). I framtaget koncept behöver ett samlingsprov skapas av det material som ska tas om hand från de olika provbehållarna efter sista neddelningssteget och att följa rekommenderad provtagningsmängd i standard.
- Det är viktigt att anpassa neddelningsapparaten till 2 gånger största stenstorlek för att undvika blockeringar
- För att undvika stenar som fastnar, kan det behövas en försortering där stenar som överstiger fraktionens maxmått (på grund av avlång form till exempel) sorteras bort. Detta kan göras i form av ett raster ovanför neddelaren som fångar upp de största avvikelserna.
- En neddelningsapparat ska klara sorteringen +0/90, då detta material är svårt att provta
- Fuktigt 0-material fastnar i neddelningsapparaten och den behöver kompletteras med utrustning för att kunna få rent neddelningsapparaten och att detta material kommer med i provet, exempelvis vibrering

- En fullstor neddelarens yttermått bör anpassas för att enkelt kunna transporteras på väg.
- Neddelaren bör förses med lyftöglor eller gaffelfickor för att enkelt kunna flyttas lokalt, med hjullastare inom en bergtäkt till exempel.
- Logistiken för hur uppsamlingslådorna ska tas om hand efter sista neddelningssteget behöver vidareutvecklas
- En fullskalemodell behöver kompletteras så att spill mellan kanalerna undviks
- Det finns behov att studera hur dagens provtagningsmetodik genererar för provtagningsfel för att visa på fördelen med föreslagen provtagningsmetodik, exempelvis genom att använda kvartering

8 Fortsatta studier

Följande förslag till fortsatta studier är:

- Neddelning av långa fuktiga sorteringar med hög finhalt kan klumpa ihop sig i en neddelning och blockera någon kanal. Detta kan begränsa fukthalt i ett bärlager eller förstärkningsmaterial.
- En robustanalys behöver genomföras med avseende på
 - Största stenstorlek
 - Partikelform av långa partiklar
 - Cohesivt material – fukthalt
 - Tömningshastighet – maximalt massflöde
- Simuleringarna med efterföljande praktiska tester av den fysiska prototypen visar i grunden på en väl fungerande utformning av neddelarens layout och geometri. Dock går det inte helt att förutse vad effekten av nedskalningen blir. Som ett nästa steg vore det därför önskvärt att utföra praktiska tester i fullskala. Det finns redan nu tankar hos projektgruppen om ett fortsättningsprojekt, där det baserat på erfarenheterna från detta projekt planeras för att ta fram en fullskalig prototyp. Denna skulle möjliggöra att fullt ut testa fraktioner upp till 0-90 och studera resultat och eventuella störningar under så verkliga förhållanden som möjligt.

9 Referenser

A Klingberg, Variationer hos materialparametrar inom ballasttillverkningen Teknisk Geologi institutionen för Mark-och Vattenteknik 27 sidor 6 bilagor 2001

EN 932-1 Ballast-Generella metoder-Del 1: Provtagning

EN 932-2 Ballast-Generella egenskaper-Del 2: Neddelning av laboratorieprov

EN 933-1 Ballast- Geometrisk egenskaper-Del 1: Bestämning av kornstorleksfördelning - Siktning

EN 1097-3 Ballast-Mekaniska och fysikaliska egenskaper-Del 3: Bestämning av skrymdensitet och hålrums halt hos löst lagrad ballast

EN 13242+A1 2007 Ballast för obundna och hydrauliskt bundna material till väg-och anläggningsbyggande

FAS Metod 207-01 Stenmaterial Provberedning

J. Quist, F. Hunger och K. Jareteg, "SBUF 13638 - Segregation of rock materials during unloading," Göteborg, 2019

J. Quist, A. Bilock, K. Jareteg och A. Persson, "SBUF 13820 - Undersökning av separationseffekter vid kompaktering av obundna material," Göteborg, 2021.

P. A. Cundall och O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies," *Géotechnique*, vol. 29, pp. 47-65, 1979.

Svensk Standard, 1999.

T. Allen, Particle Size Measurement, 4th ed. Chapman & Hall, London (1993).