

Slutrapport för
Utveckling av simuleringsförmåga och avancerade processmodeller
för bergmaterial-, malm- och mineralproduktion
LCA moduler

VINNOVA projekt: 2015-02521
SBUF forskningsprojekt nummer: 13158

Dr. Gauti Asbjörnsson,
Dr. Erik Hulthén

Chalmers tekniska högskola
41296 Göteborg



CHALMERS

Sammanfattning

För att uppnå en hållbar försörjning av bergmaterial och mineral krävs ett ständigt arbete med att minska täkternas påverkan på miljön. En viktig förutsättning av att lyckas med detta är en hög förståelse av hur produktionssystemens miljöpåverkan ser ut. LCA är ett välbeprövat sätt att på ett systematiskt sätt beskriva miljöpåverkan, men det är inte lätt tillgängligt för de som arbetar ute i täkterna och väldigt komplext att genomföra.

Sedan 2010 har Chalmers Rock Processing Systems jobbat med att modellera upp maskiner och processer så täkternas produktion och flöden kan simuleras i en simuleringsplattform. Just nu pågår ett aktivt arbete med att göra plattformen mer tillgänglig för industrin så de som arbetar i täkterna kan använda det för att optimera maskinernas inställningar, utbilda ny personal mm.

Som ett sidoprojekt till huvudprojektet Utveckling av simuleringsförmåga och avancerade processmodeller för bergmaterial-, malm- och mineralproduktion (USAP), kommer samma företag vara involverade förutom LKAB. Detta projekt gäller NCC – Glimmingen, Swerock – Gladö och Skanska – Angered. För Jehander skapades en generisk process baserad på Skanska - Angered

Detta projekts syfte är att skapa en LCA modul till simuleringsplattformen. Genom att koppla en miljöpåverkan till varje enskild maskin och därefter simulera flödena kan miljöpåverkan fås fram för varje enskild sortering som tækten säljer. Verktuget har utvecklats för att vara generellt, vilken anläggning som helst ska kunna skapas i plattformen. Tre anläggningar har modellerat. Dess miljöpåverkan har att simuleras i den nya LCA modulen, samtidigt som man får med alla redan befintliga funktioner. Därmed har ett verktyg skapats för att göra miljöanalyser för en bransch där det idag inte finns något standardiserat sätt att utföra detta. Ett antal parametrar har valts ut som inkluderas i plattformen som till exempel CO₂, El, bränsle och sprängmedel.

Innehållsförteckning

Inledning.....	4
Resultat.....	5
Systemgräns	5
Miljöparametrar.....	7
Modellering	7
Konfiguration	15
Simuleringar.....	16
Vidareutveckling.....	18
Vetenskaplig publicering	19
Tack.....	19

Inledning

För att uppnå en hållbar försörjning av bergmaterial och mineral krävs ett ständigt arbete med att minska täkternas påverkan på miljön. En viktig förutsättning av att lyckas med detta är en hög förståelse av hur produktionssystemens miljöpåverkan ser ut. LCA är ett välbeprövat sätt att på ett systematiskt sätt beskriva miljöpåverkan, men det är inte lätt tillgängligt för de som arbetar ute i täkterna och väldigt komplext att genomföra.

Life Cycle Assessment (LCA) är en vida använd metod för att beskriva produkters miljöpåverkan under hela deras livstid. Omfattningen av olika LCA analyser varierar från att bara omfatta en miljöparameter, till exempel CO₂, till att ta med alla miljöfaktorer som kan påverka produkten. Oavsett detaljnivå är det en mycket grundlig metod eftersom hänsyn tas till alla steg i produktens livscykel. Det innebär att LCA ofta betraktas som en resurs och tidskrävande metod. Genom detta projekt kommer det att bli mycket enklare att kartlägga miljöpåverkan för en ballasttäkts produkter. Produkter utgörs av de olika storleksorteringar som tåkten säljer såsom 11/16, 4/8, 0/2 m.fl.

Också hur stor del av produktens livscykel som omfattas av LCA analysen kan variera. Detta projekt syftar till att skapa ett verktyg för att göra en så kallad "Cradle to Gate" för täkternas produkter. Med detta menas att produkternas miljöpåverkan från avbaning fram till när material finns tillgängligt för kunden.

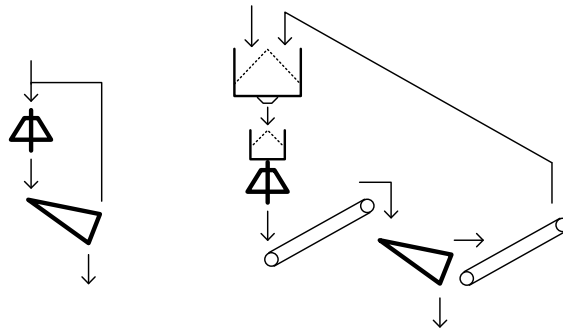
Det första steget i en LCA är att ta fram ett flödesschema över produktens livscykel för att sedan ta fram miljöpåverkan som varje enskilt steg bidrar med till produkten. Som tidigare nämnts så kan antalet parametrar som tas med i LCA analysen variera. När termen miljöpåverkan används i denna ansökan inkluderar det data som tas fram för flera olika miljöparametrar.

I de flesta produktionsprocesser görs flera olika produkter. Vilket innebär att miljöpåverkan från de gemensamma processtegen behöver delas mellan dessa produkter. Detta kallas allokering. Den gemensamma miljöpåverkan delas procentuellt mellan produkterna. Den procentuella fördelningen kan bland annat baseras på massa eller produkternas kostnad. När processen delar sig delas miljöpåverkan från de gemensamma processtegen upp procentuellt enligt allokeringen mellan produkterna. I verkligheten är processerna mycket mer komplex med fler steg, cirkulerande flöde och fler produkter. Genom att lägga en miljöpåverkan hos varje enskild maskin kan flödena belastas med denna miljöpåverkan då de passerar maskinen och varje färdig produkt får en uträknad miljöbelastning för varje enskild miljöparameter.

Som ett sidoprojekt till huvudprojektet *Utveckling av simuleringsförmåga och avancerade processmodeller för bergmaterial-, malm- och mineralproduktion (USAP)*, kommer samma företag vara involverade förutom LKAB. Detta projekt gäller NCC – Glimmingen, Swerock – Gladö och Skanska – Angered. För Jehander skapades en generisk process baserad på Skanska - Angered

Resultat

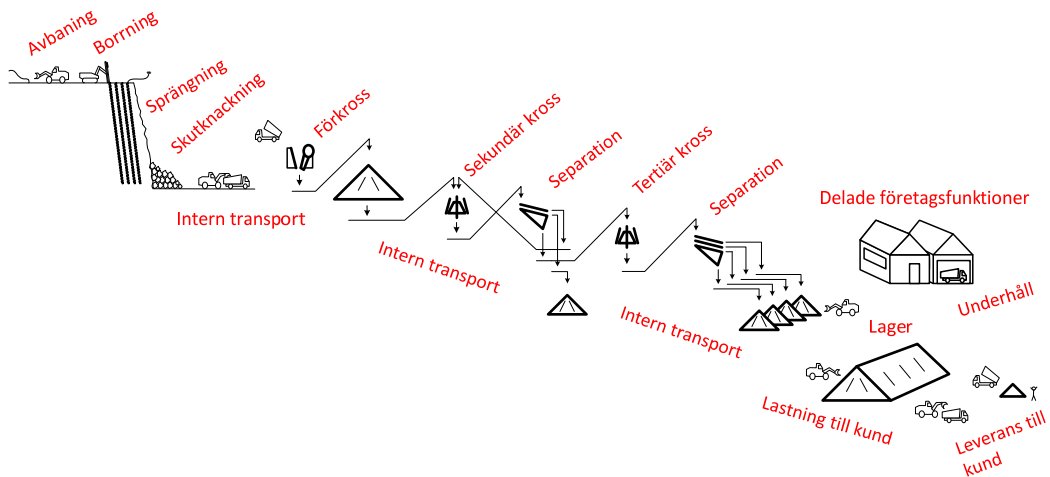
Projektet fokuserade framförallt på utveckling av LCA moduler i simulatören och initiala tillämpningsförsök av simulatören inom miljöanalys av processer. Arbetet har fokuserat på områden som kan dra nytta av möjligheten att kunna representera miljöparametrar i en dynamisk simuleringsplattform, Figur 1.



Figur 1. Principskiss för modelleringen av en anläggning för Dynamisk simulering.

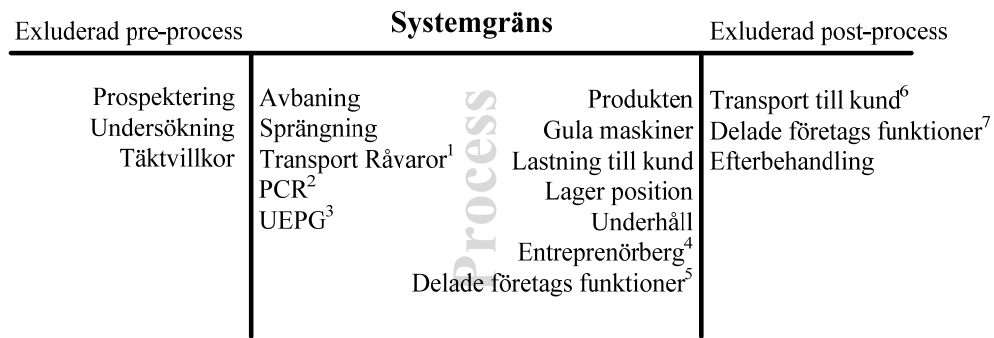
Systemgräns

Först steget var att identifiera lämpligt systemgräns tillsammans med de involverade företagen. Från workshop I bearbetades fram systemgränser för modelleringen och simuleringen. Figur 2 illustrerar övergripande bild över hela processkedjan.



Figur 2. Referens process layout for val av systemgräns.

Diskussionerna fokuserad på gränsen till själva processen där sönderdelning och separation sker. Resultatet visas i Figur 3. Prospektering, undersökning och täktvillkor lämnas utanför projektets omfattning samt transport till kund, vissa företagsfunktioner, schabloner och efterbehandling av täkter



Figur 3. Definierade systemgränsen till analysen.

I tabell 1 förklarats vissa aspekter av gränssfallen, organisation och oklara faktorer som diskuterades i samband med workshopen I.

Tabell 1. Förklaringar till gränssfall.

#	Delprocess	Förklaring
1	Transport av råmaterial	Tillverkning och leverans av förbrukningsvaror är en komplex process och kan bidra till den övergripande miljöpåverkan. Detta kan inkludera sprängmedel, slitgods, oljor. Undersökning startar att få in normaliserade data för identifierade förbrukningsvaror per kg förbrukat
2	PCR	Product Category Rules – Regler och riktlinjer för Miljövarudeklarationen (EPD). Undersökning startar för att matcha gränsen till definierade gränser inom standarden.
3	UEPG	Union Européenne des Producteurs de Granulatsen (UEPG) är Europeiska ballast förbundet och är ansvariga för Miljövarudeklarationen (EPD). Undersökning startar för att matcha gränsen till definierade gränser inom riktlinjerna från UEPG.
4	Entreprenörberg	Entreprenörberg kan påverka täkternas produktion och övergripande miljöpåverkan. En modul ska inkluderas som tar hänsyn till entreprenörberget ursprung
5	Delade företagsfunktioner	Dessa funktioner inkluderar funktioner som är direkt kopplade till täktverksamheten i själva brottet. t.ex. vägbygge, avbaning, delade transporter,
6	Transport till kund	Transport till kund varierar stort och det är stor brist på information vart materialet transporteras efter att det är lastat till kund på plats, bör förberedas som tilläggsmodul i senare version
7	Delade företagsfunktioner	Dessa funktioner inkluderar funktioner som är inte direkt kopplade till täktverksamheten i själva brottet. Kontor, belysning, våg osv.

Miljöparametrar

Val och sortering av miljöparametrar som blev utvald för modellering under workshop I räknas upp i Tabell 2. Parametra kopplade till utsläpp, energiförbrukning och energikälla är väsentliga och följs av sekundära parametrar som sprängmedel, massbalans, slitgods och stoftemission.

Tabell 2. Valda miljöparametrar.

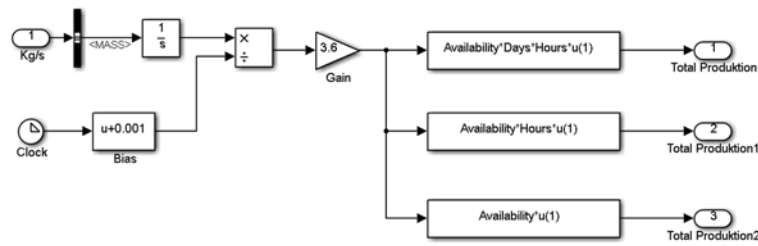
#	Parameter	Förklaring
1	CO2 – ekv (GWP)	Alla relevanta utsläpp som bidrar till växthuseffekt grupperas till CO2 ekvivalent värde.
2	AP	Alla relevanta utsläpp som bidrar till försurning grupperas till SO2 ekvivalent värde.
3	EP	Alla relevanta utsläpp som bidrar till övergödning grupperas till NOx ekvivalent värde.
4	Energiförbrukning	Energiförbrukning på varje system och process kommer definieras som kWh/(ton produkt).
5	Energikälla	Inkluderar både bränslen (diesel, gas, bensin, pellets etc) och elförsörjning beroende på systemet, i framtiden även solenergi, vindkraft, vågkraft etc.
6	Sprängmedel	Förbrukningsvara som kopplas direkt till sönderdelningen på materialet, emissioner och energi vid tillverkning av sprängmedel bedöms efter leverantörers materialdata eller generiska data. Energi och emissioner vid detonation ingår inte inom systemgränsen.
7	Massbalans	Indikation på processens avkastning och utfall
8	Slitgods	Förbrukningsvaror i processen som mantlar och siktduk (grov undersökning och uppskattning ska ske för att se om effekten är försumbar eller inte).
9	Stoftemission	Damm från processen (grov undersökning och uppskattning ska ske för att se om effekten är försumbar eller inte).

Modellering

Modelleringen av olika parametrar varierar från att vara maskinspecifika som till exempel energiförbrukningen till att vara generell som kvantifieringen av diesel utsläpp. Varje modell är specificerad utifrån själva matematiska termen tillsammans med vilka variabler kommer vara input från användaren och illustrering av Simulink modellen.

Produktion

På grund av långsam beräkningstid är det orealistisk att simulera årsproduktion med en enda simulering. Därför kommer långtids produktion att estimeras utifrån användarnas definierade produktionsdagar och tillgänglighet för processen under tiden, Figur 4.



Figur 4. Totala produktionen estimerad.

Energiförbrukning

Varje modell som utnyttjar elektricitet kommer definieras utifrån ek. (1) vilket innebär att den totala energiförbrukningen beror på en tomgångseffekt och effekt utifrån belastning. Tomgång effekten är satt till 10% av den installerade effekten på motorn.

$$P = P_{load} + P_{idle} \quad (1)$$

Kross

Krossarnas energiförbrukning modelleras på två sätt. För konkrossar används ekvationen som utvecklades av Evertsson (2) och för förkrossar används Bonds-ekvation (3). Parametrarna har att göra med geometrin i krossen men användaren definierar krossen spalt, slag och varvtal.

$$P_{load} = M \omega = \omega \left(\frac{a_{res}}{\cos(\varphi_1 + \varphi_2)} - h_w \frac{\sin \varphi_1 \sin \varphi_2}{\cos \varphi_1} \right) R_{res} \cos \varphi_1 \frac{e}{h_e} \sin \alpha_e \quad (2)$$

$$P_{load} = W_i \cdot Q \cdot 10 \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{f_{80}}} \right) \quad (3)$$

Transportband

Transportbandet energiförbrukning utvecklades av Hulthén och definieras utifrån bandets längd, hastighet, lutning och massflöde (4).

$$P_{load} = m(gh + v^2 + v\sqrt{2gh_{drop}} \sin \alpha) \quad (4)$$

Matare och siktar

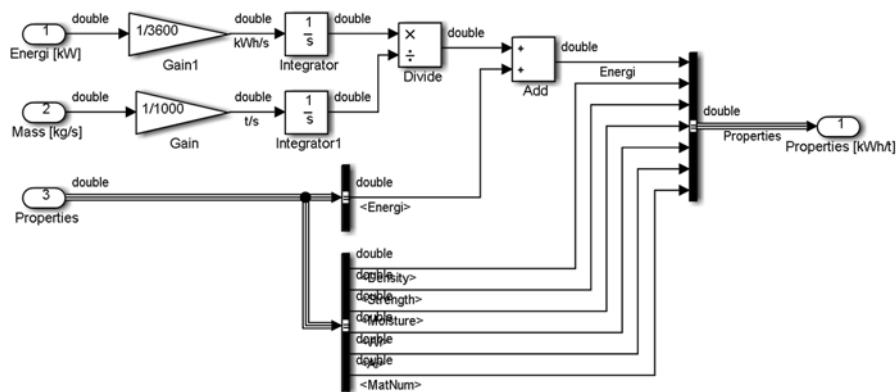
Matarar och siktar varierar inte mycket i energiförbrukning och är i vanliga fall inte nära överbelastning. Ett enkelt samband konstruerade för att ta hänsyn till power factorn under körning och den tar hänsyn till max installerad effekt och maxbelastningen för maskinen (5).

$$P = \left(0.9 \left(\frac{m}{m_{max}} \right)^2 + 0.1 \right) P_{installed} \quad (5)$$

Energi

Specifika energin ackumuleras och läggs till på massan under körning (6). Figur 5 illustrerar konfigurationen i Simulink.

$$SE_{mass,ut} = \frac{\int_0^t kWh}{\int_0^t m} + SE_{mass,in} \quad (6)$$



Figur 5. Simulink modell över energi ackumuleringen.

Energikälla

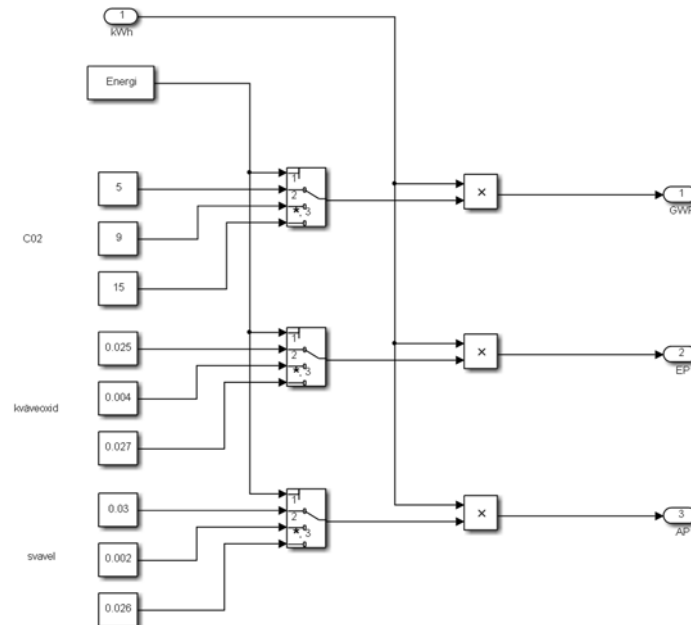
Vilken energikälla används kommer påverka processen miljöpåverkning. Enligt Vattenfalls livcykelanalys och Energimyndigheten analys på elproduktion i Norden, är spridningen enligt Tabell 3. Användarna kommer även kunna registrera egna värden. Figur 6 illustrera hur olika switchar bestämmer vilka konstanter används.

Tabell 3. Utsläpp från energiförbrukning.

Parametrar	Kärnkraft	Vattenkraft	Vindkraft	Nordiskt mix ¹	Nordisk mix ²
g CO2 e/kWh	5	9	15	125.5	51.9
g NOX e/kWh	0.025	0.004	0.027	-	0.11
g SO2 e/kWh	0.03	0.002	0.026	-	0.061

¹ Emissionfaktore för nordisk elproduktion - Energimyndigheten

² Vattenfall livcykelanalys



Figur 6. Switchar i Simulink som bestämmer vilka konstanter används.

Diesel

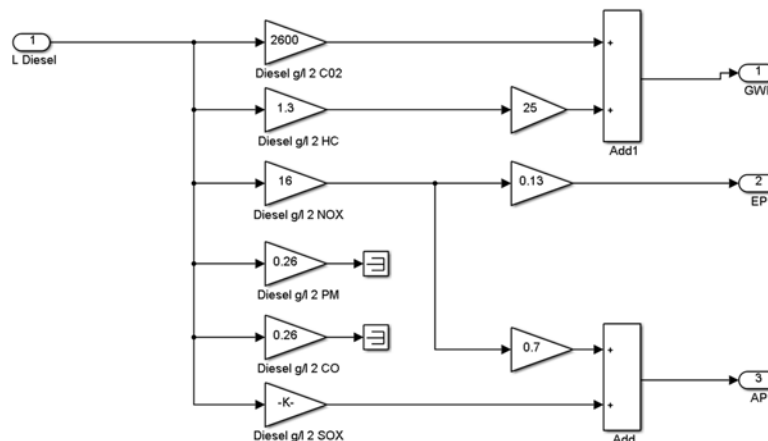
Bränsleförbrukning och utsläpp från gula maskiner är bra dokumenterad. Utsläpp från tunga diesel fordon består av:

- CO₂ (koldioxid) – 2600 g/l
- CO (kolmonoxid) – 2.3 g/l
- NO_X (kväveoxider) – 16 g/l
- HC (kolväten) – 1.3 g/l
- PM (partiklar) – 0.26 g/l
- SO_X (svaveloxider) – 0.00081 g/l

Översättningen av de olika utsläppen utifrån CO₂, PO₄ och SO₂ ekvivalenta faktorer bestäms av Tabell 4 och illustreras i Figur 7.

Tabell 4. Konvertering av utsläpp till ekvivalenta faktorer

Utsläpp	CO ₂ ekv. (GWP)	PO ₄ ekv. (EP)	SO ₂ ekv. (AP)
CO ₂	1	-	-
CO	-	-	-
NO _X	-	0.13	0.7
HC	25	-	-
PM	-	-	-
SO _X	-	-	1



Figur 7. Upplägget av information i Simulink.

Hjullastare

All transport av material inom stenbrottet är inkluderat i simuleringen. Transport från sprängd salva till förkross och från sortering till lagerhög, distans mellan olika punkterna, snittförbrukning per maskin och antalet för uppgiften (7).

$$L_{Diesel} = \frac{m_{Tot}}{m_{kap}} D_{salva} E_{Hjull} n \quad (7)$$

Borrning

Borrningen utförs av dieseldrivna borrar och förbrukningen bestäms utifrån antal bormeter, den totala volymen av borrarat berg och snittförbrukningen för borrar (8).

$$L_{Diesel} = \sqrt{\frac{m_{Tot}}{\delta L_{Hål}}} D_{Hål} E_{Borr} \quad (8)$$

Sprängning

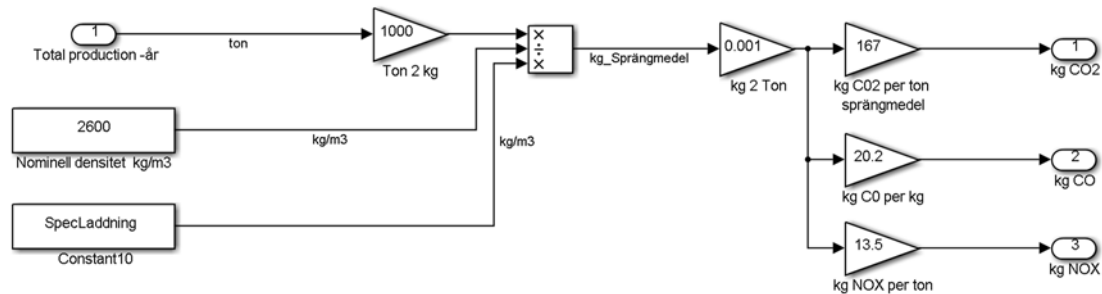
Hur mycket mängd sprängmedel används (9) för ballast produktion bestäms av den totala produktionen och specifika laddningen (SL) som definieras kg sprängmedel per kubikmeter, Figur 8.

$$m_{Sprängm} = \frac{m_{Tot} SL}{\delta} \quad (9)$$

Sprängning medlet har en viss miljöpåverkan under tillverkning och användning. Tabell 5 visar utsläpp för användningen av sprängmedel.

Tabell 5. Utsläpp från användning av sprängmedel.

Parameter	g CO ₂ /kg sprängmedel	g CO/kg sprängmedel	g NO _X /kg sprängmedel
kg Sprängmedel	167	20.2	13.5



Figur 8. Simulink modellen över sprängutsläppen.

Avbanning

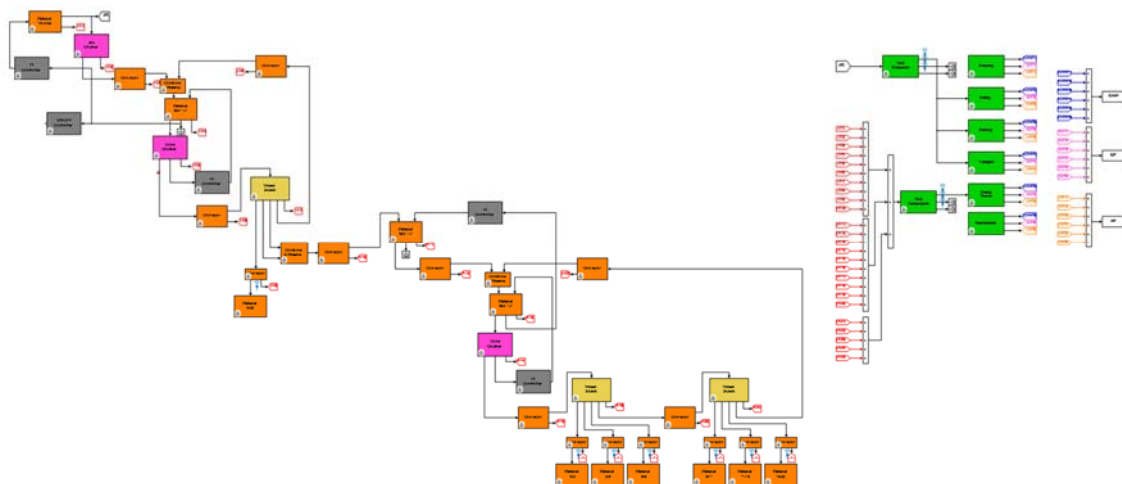
Avbanningen är definierad utifrån användarens input information för området.

Underhåll

Liknande som användningen av sprängmedel så finns det fler förbrukningsvaror i form av mantlar, siktdukar och smörjolja. Dessa kvantifierades inte under projektet.

Process

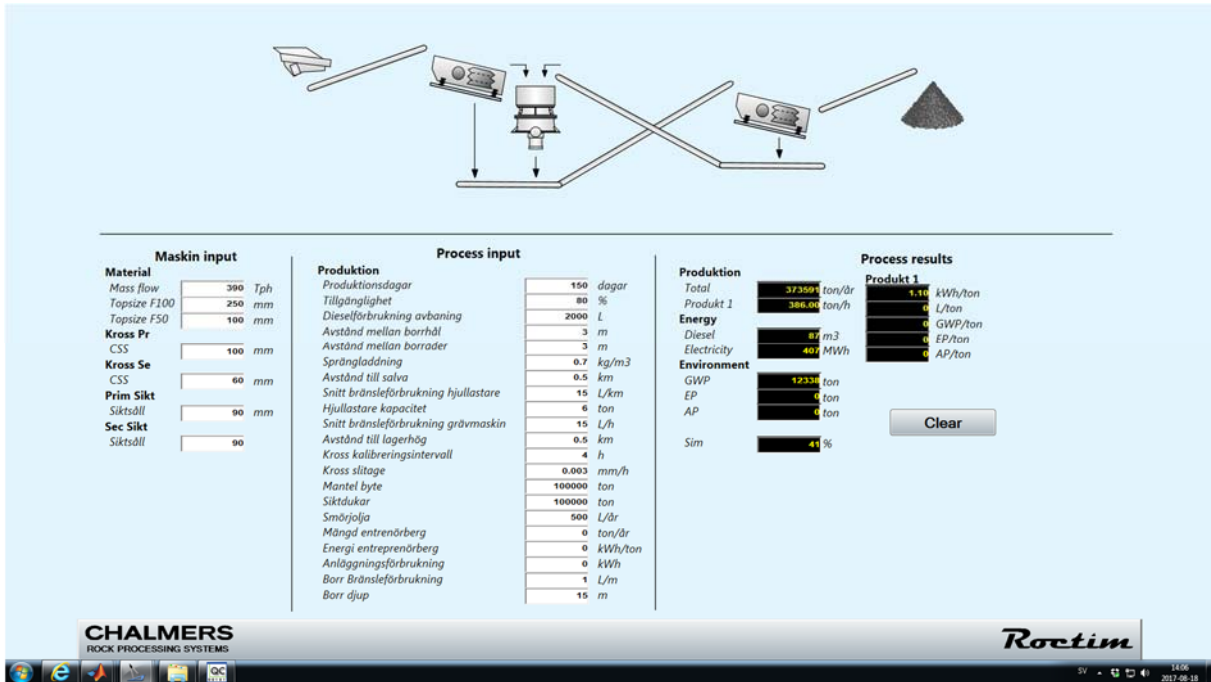
Varje process modellerades upp i Matlab/Simulink. Figur 9 illustrerar en av processerna modellerad i Simulink med tillhörande enhetsmodeller i gult, grått, lila och orange och ytterligare LCA-moduler i grönt.



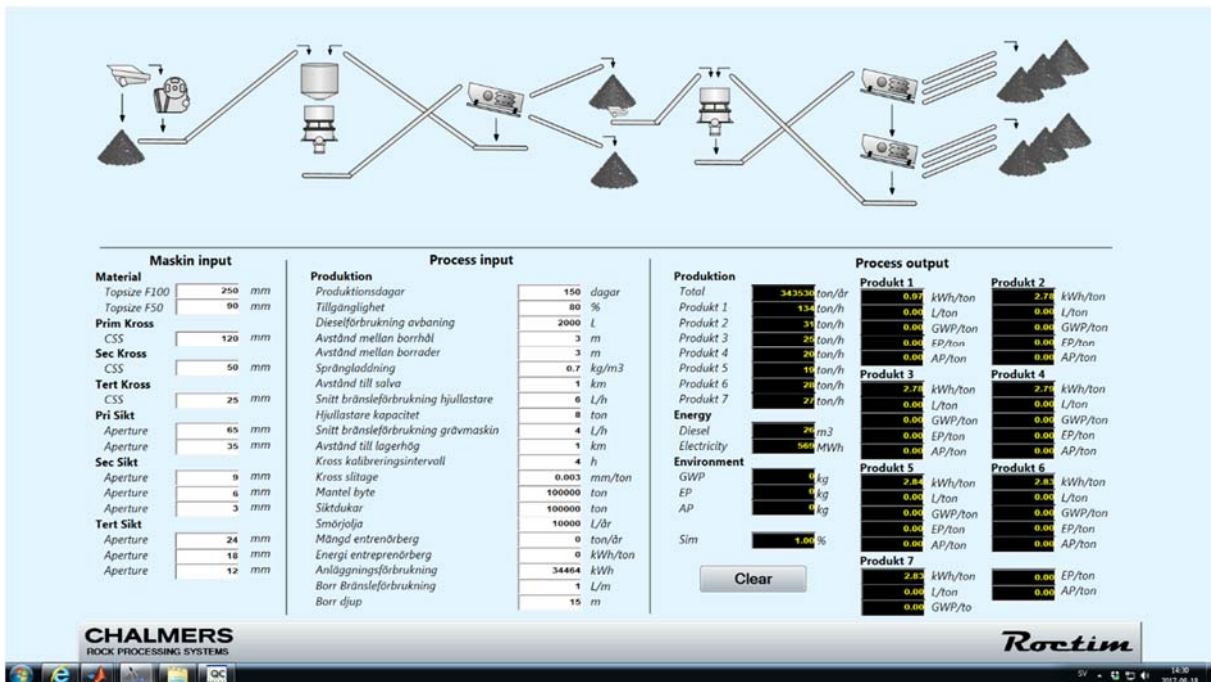
Figur 9. Processmodell av en av processerna i projektet.

Gränssnitt

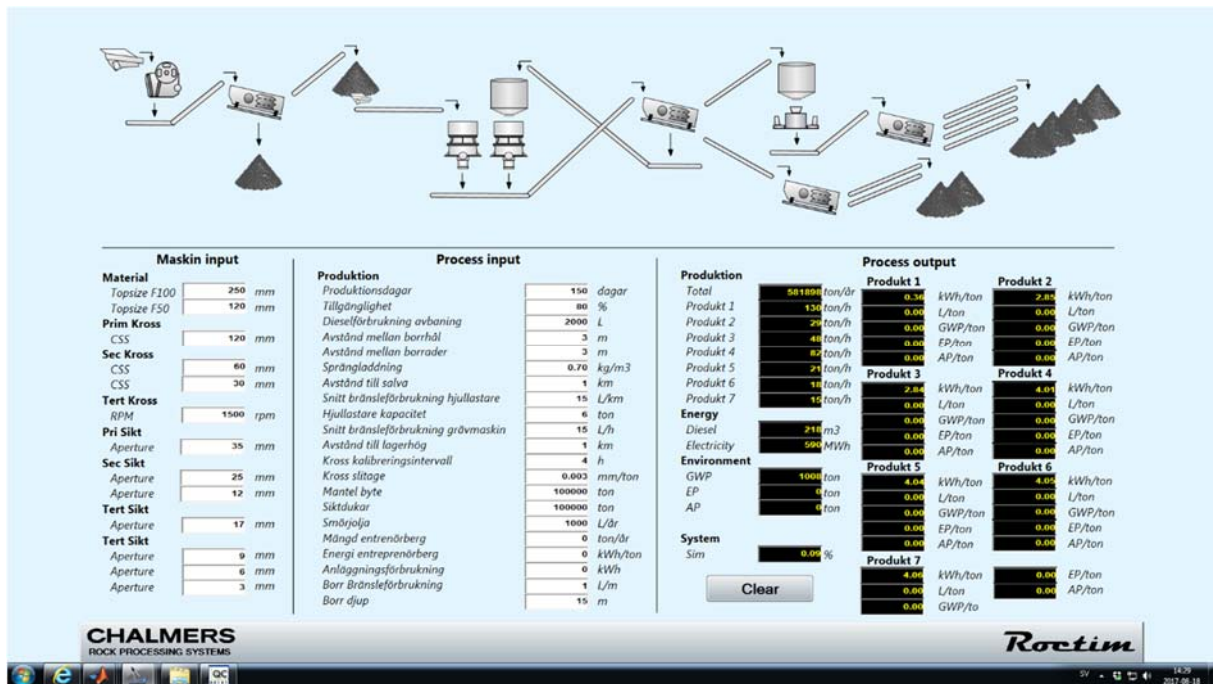
För att möjliggöra access för företagen till simuleringarna krävs det ett användargränssnitt. Olika konfigurationer av gränssnitt har konstruerats under projektet för att passa till varje enskild process. Figur 10 – Figur 12 illustrerar gränssnitten som konstruerades under projektet för att visualisera resultatet från simuleringarna.



Figur 10. Gränssnittet för en av processerna i LCA projektet.



Figur 11. Gränssnittet för en av processerna i LCA projektet.



Figur 12. Gränssnittet för en av processerna i LCA projektet.

Figur 10 - Figur 12 illustrerar gränssnitt som är ett förslag på hur användaren kan smidigt få tillgång till processlayouten, ställa upp processen och se resultatet utan att byta mellan olika vyer. Vilka variabler användaren har tillgång till och kan antingen påverka (input) eller se som resultat (Output) sammanställs i Figur 13. Dessa bearbetades fram med företagen under workshop II.

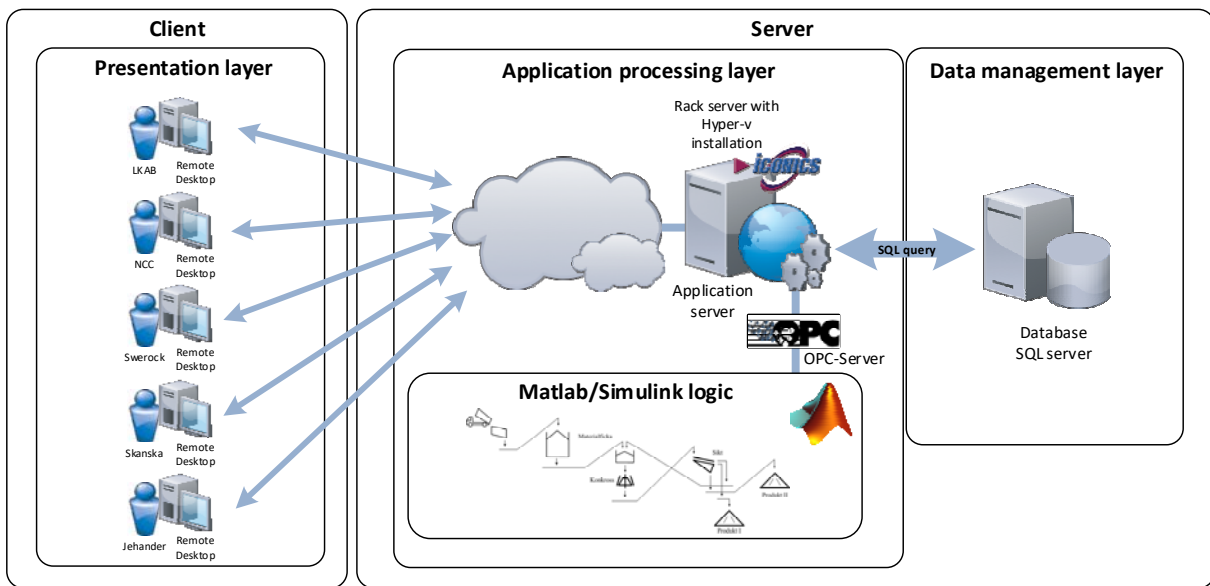
Input	Output
<p>Avbaning</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Liter diesel</i> <p>Borrning</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Snitt djup</i> • <i>Bränsleförbrukning</i> • <i>Avstånd</i> <p>Krossar</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Spält</i> <p>Siktar</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Siktsåll</i> <p>Sprängning</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Laddning</i> <p>Transport till</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Kapacitet</i> • <i>Avstånd</i> • <i>Bränsleförbrukning</i> <p>Transport från</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Kapacitet</i> • <i>Avstånd</i> • <i>Bränsleförbrukning</i> <p>Underhåll</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Kalibreringsintervall</i> • <i>Mantel byte</i> • <i>Duk byte</i> • <i>Förbrukningsvaror</i> <p>Produktion</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Dagar</i> • <i>Tillgänglighet</i> 	<p>Enheter</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Massflöde</i> • <i>Storleksfördelning</i> • <i>kWh</i> • <i>Liter diesel</i> <p>Produkter</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Massa</i> • <i>Storleksfördelning</i> • <i>Specifik energi</i> <p>Produktion</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Årsproduktion</i> • <i>Dygnsproduktion</i> <p>Utsläpp</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>GWP</i> • <i>EP</i> • <i>AP</i>

Figur 13. Sammanfattning av input och output variablerna som användaren har tillgång till.

Konfiguration

Arbetet inom simuleringsplattformen kan delas upp i två spår. Mjukvaru- och hårdvarumässig utveckling. Inom hårdvaruspåret har en ny plattform utvecklats för att få upp stabiliteten ytterligare. Plattformen som valts bygger på Windows Server 2012, vilket öppnade upp möjligheten för scripting och automatiserade saker för användaren och kommer öka användarvänligheten betydligt.

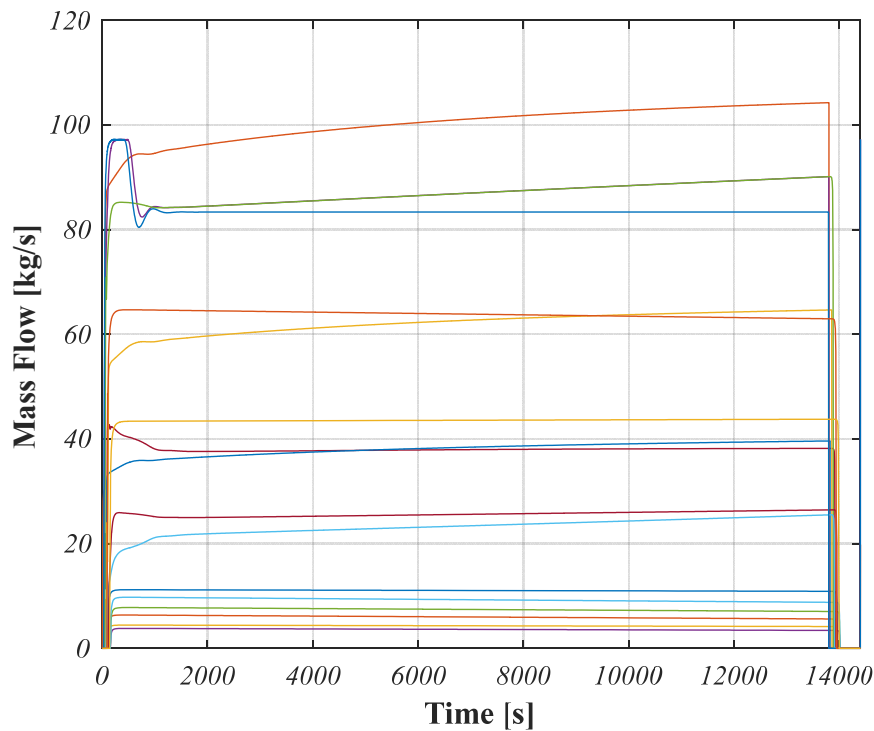
En rackserver har installerats för att kunna sätta upp systemet för ett antal parallella gränssnitt. I figur 14 visas i mitten en rackserver med en Hyper-v installation som innebär att Chalmers kan administrera gränssnitten enkelt och snabbt, samtidigt som partners kan köra på en virtuell maskin och köra simuleringar samtidigt. All kommunikation mellan simuleringarna och gränssnitten hanteras av en OPC server och valda variabler loggas kontinuerligt med SQL server.



Figur 14. Systemlayout för simuleringsplattformen.

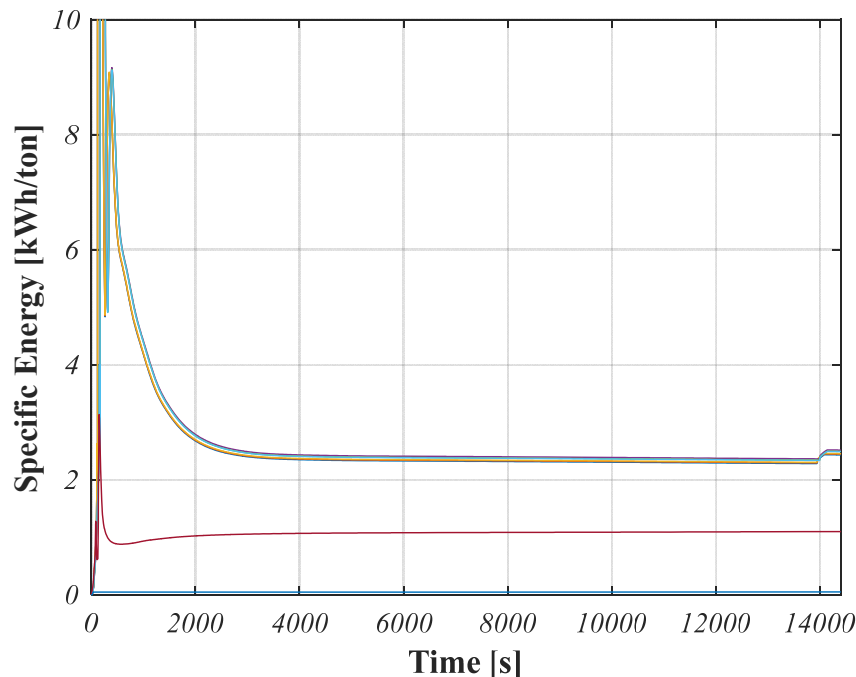
Simuleringar

För att uppskatta miljöpåverkan från simuleringen så delades simuleringarna upp i 8 timmars intervaller. Under varje simulering så aktiveras en kalibrering av krossar efter 4 timmar för att uppehålla viss produktkvalitet. Figur 15 visar exempel på massflöde på olika transportband i en process.



Figur 15. Massflöde på olika transportband i processen.

För att uppnå ett värde för processen krävs en representation av processen över ett antal timmar iallafall. Under uppstart av process så påverkas specifik energi för varje produkt starkt av tomgångseffekten av antal maskiner innan processen har uppnått ett statistiskt läge, dvs. om processen kan uppnå ett stabilt läge. För en ostabil process kommer det vara ännu viktigare att köra grundsimuleringen i antal timmar innan värdefulla resultat är möjliga. Figur 16 illustrerar utvecklingen av specifik energi för produkterna ändras under simuleringstiden.



Figur 16. Ackumulerad specifik energi per producerad ton för varje produkt.

Miljöpåverkan kommer variera mellan processerna och hur man kör dem. Tabell 6 och Tabell 7 visar olika resultat för olika produkter under olika förhållande för samma process. Bara under de två förhållanden varierar produkternas CO₂ utsläpp mellan ca 1500 -2400 g CO₂/ton produkt.

Tabell 6. Resultat från en grundsimulation.

Produkter	Ton/dag	kWh/ton	g CO ₂ /ton
0/2	248.7	2.58	1851.6
2/5	199.2	2.58	1851.6
5/8	163.7	2.59	1852.9
8/11	150.8	2.64	1859.4
11/16	226.8	2.63	1858.1
16/22	218.4	2.63	1858.1
0/32	1055.8	0.96	1641.0
0/90	1078.5	0.05	1522.7
Delat	-	-	1516.2
Total	3142.2	1.26	-

Tabell 7. Resultat från en simulering av en annan konfiguration av samma process.

Produkter	Ton/dag	kWh/ton	g CO2/ton
0/2	305.6	2.58	2409.9
2/5	165.5	2.58	2409.9
5/8	118.8	2.59	2411.2
8/11	99.7	2.64	2417.7
11/16	205.1	2.63	2416.4
16/22	256.6	2.63	2416.4
0/32	1062.9	0.96	2199.3
0/90	1074.5	0.05	2081.0
Delat	-	-	2074.5
Total	3344.6	1.26	-

Vidareutveckling

Fokus i projektet har inte bara varit på att utveckla LCA moduler för ballast produktion men också evaluera och utveckla applikation för att använda dynamiska simuleringar för att uppskatta miljöpåverkan olika produkter har inom ballast produktion. Det är tydligt att det finns en brist på lämpliga modeller och mjukvaror som kan utföra den typen av analys och allokeringen av miljöparameterar i nuläget kan ge felaktig bild av verkligheten. Projektet LCA moduler till dynamisk process modeller har lett till en ny projektansökan SBUF. Nästa steg kommer att fokuseras på validering av modellerna och undersöka strategier för att certifiera simuleringarna för LCA analyser.

Vetenskaplig publicering

Som en del i arbetet skickades artiklar in för publicering på lämpliga konferenser:

1. *Modelling of Environmental Impacts of Aggregates with Dynamic Simulations*, Presenterats på European Symposium for Comminution and Classification '17 som ägde rum i Izmir, Turkiet 2017.
2. *Comminution process modelling from a sustainably perspective*, Skickad till Comminution '17 som äger rum i Cape Town, Sydafrika 2018.

Tack

Vi vill tacka VINNOVA och SBUF för sitt finansiella stöd. Tack också till medverkande företag och projektdeltagare.