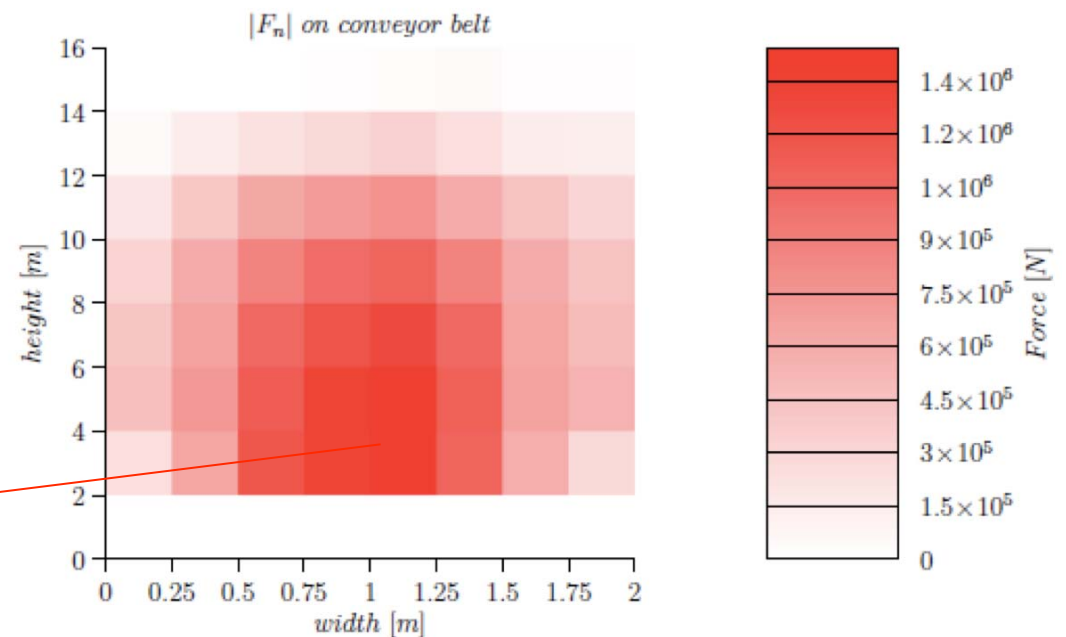
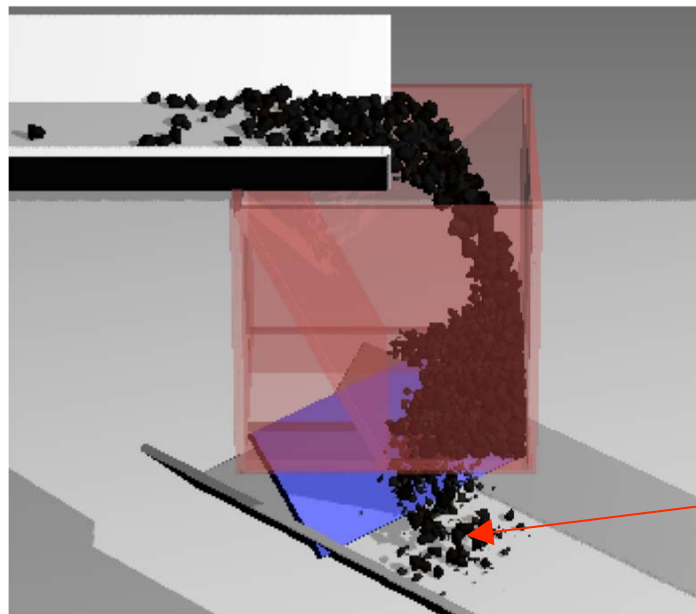




Simulering av kontaktkrafter och nötning i transportörsystem för malm



John Nordberg¹, Martin Servin^{1,2}

¹UMIT Research Lab vid Umeå universitet

²Algoryx Simulation

2011-08-25

Med stöd av ProcessIT Innovations



Sammanfattning

Syfte

Utreda om nya metoder för simulering av komplexa mekaniska system är tillämpbara vid design av transportörsystem och utläggare för granulära material

Mål

Ta fram demonstrator och exemplifiera. Etablera kontakt med anläggningsägare och systemleverantörer som kan vara intresserade av designstöd. Gemensamt utvärdera intresse och möjlighet för utveckla/integrera ändamålsenligt designverktyg.

Preliminära resultat

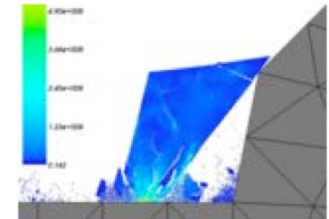
Demonstrator för övergång mellan transportörer med mullhylla och accelerator framtagen. Enkel modell för nötning utifrån simulerade kontaktkrafter. Tidsseffektiv simulering: 1 sek förlopp med ca 25.000 kontakter mellan 2.500 kroppar tar 60 sek simuleringstid.



Simuleringsmetoder för granulära material

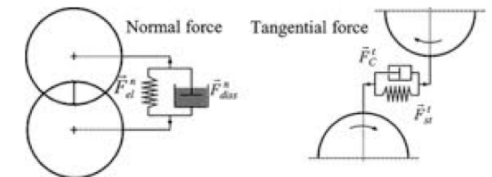
Finite element method (FEM)

Deformerbara kroppar. Små tidssteg. Långa beräkningstider.



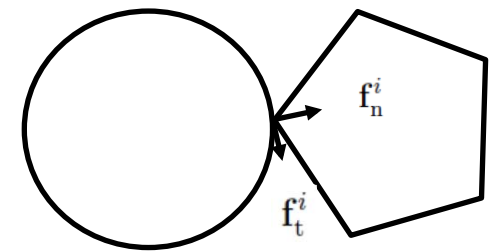
Discrete element method (s-DEM)

Stela kroppar med fjäderbaserad kontaktmodell. Små tidssteg men snabbare och större system än FEM. Bra val för system för finkorniga material.



Non-smooth discrete element method (n-DEM)*

Stela kroppar med kontaktmodell baserad på bivillkor (Lagrange-multiplikatorer) för icke-penetration och Coulombfriktion. Mer numeriskt krävande än sDEM men klarar stora tidssteg och blir totalt snabbare för grovkorniga stela material. Metoden används i realtidssimulering av fordon (tex träningsimulatorer).



* Också känd som 'nonsmooth contact mechanics' (Moreau, Jean, Renouf)



Valt demonstratorsystem

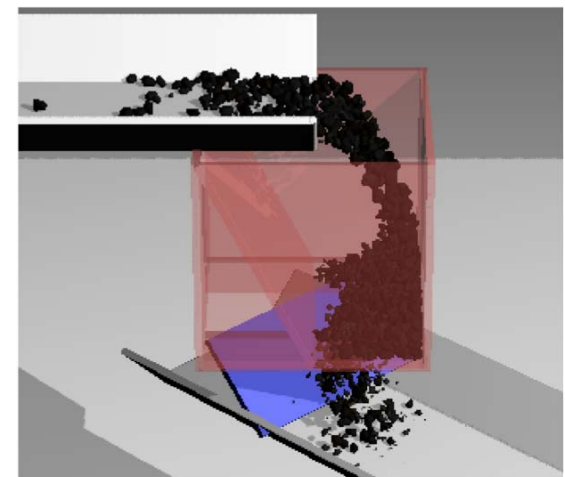
Övergång mellan två bandtransportörer i vinkel. Övergången är konstruerad med:

- mullhylla (fallande material dämpas mot 'gammalt' ackumulerat material)
- akselerator (leder materialet vidare och ut på nästa transportör)

Betydande förslitningsproblem vid bla Aitik-gruvan -> kort livstid på akselerator, mullhylla eller transportör (vilken? var?) -> driftstopp

Vi har gissat vad gäller vissa delar av dimensionering

- transportör bredd 2 m
- fallhöjd ca 4 m
- stenar upp till 0.1 m och 25 kg





Analys

För att exemplifiera har en analys genomförts av kontaktkrafter mellan stenar och utrustning samt förslitning på utrustning. Baserad på AgX Multiphysics Toolkit.

Analysen bygger på en enkel modell för nötning (Archard wear model) som vi vet inte är korrekt med antas ha samma beståndsdelar som en korrekt model.

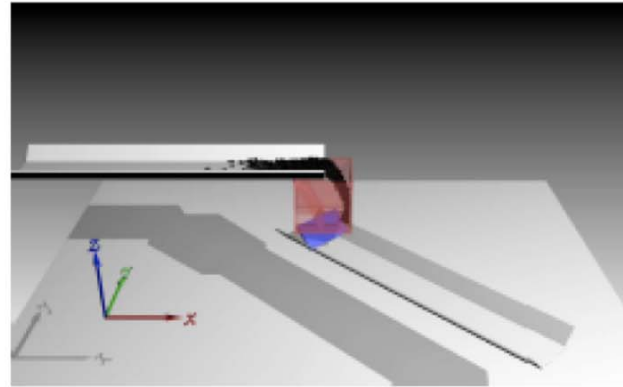
Nötning från varje kontakt beräknas utifrån normalkraften (trycket) och glidhastigheten i skiktet mellan kontaktytorna.

$$Q_{tot} = \sum_i \int_{t_1}^{t_2} \frac{KW_i V_i}{H} dt$$

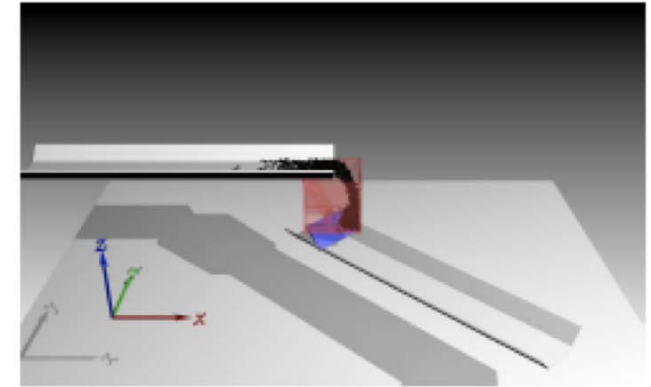
Nötning Q (volym bortnött material), normalkrafter W_i , glidhastighet V_i , hårdhet H (Vickers) och konstant $K=10^{-6}$.



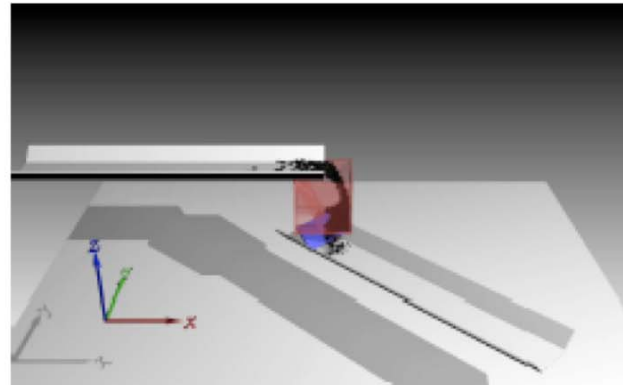
Resultat



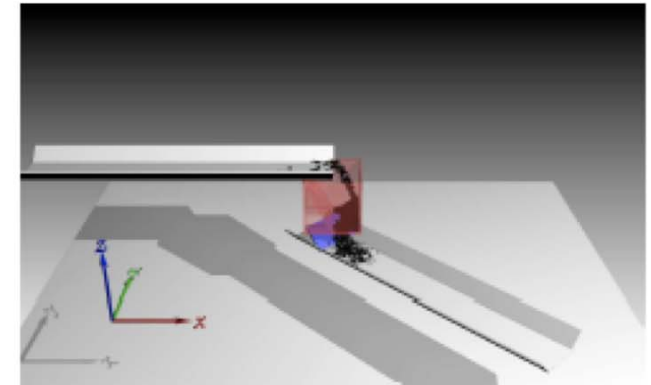
(a) 6 seconds



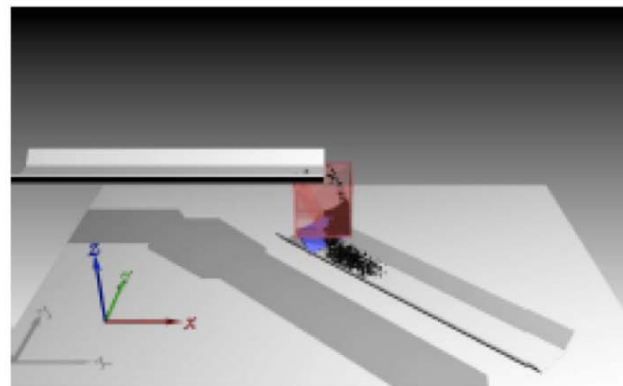
(b) 7 seconds



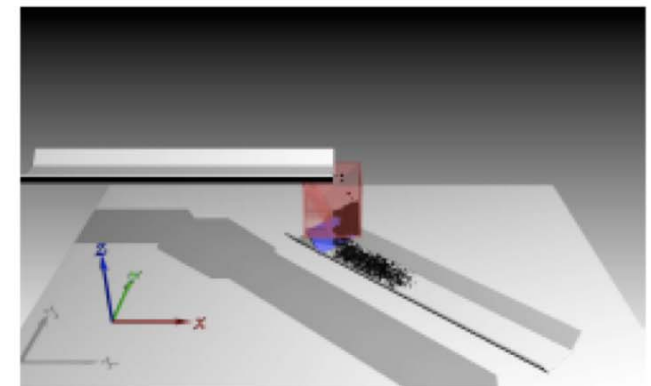
(c) 8 seconds



(d) 9 seconds



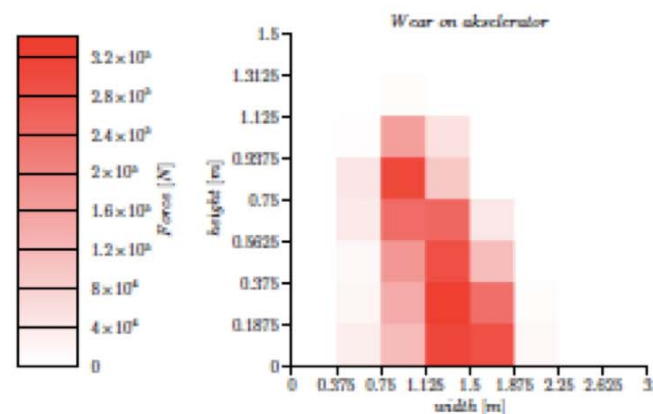
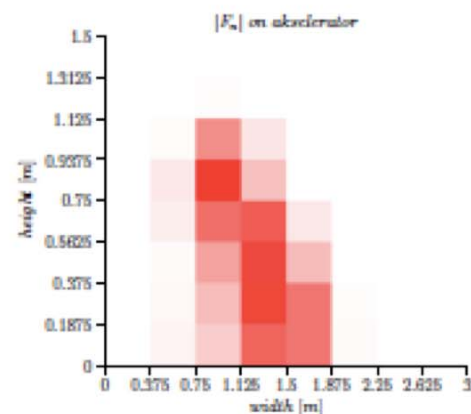
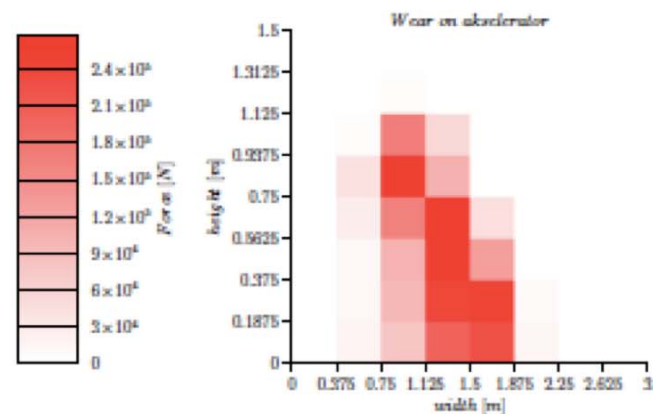
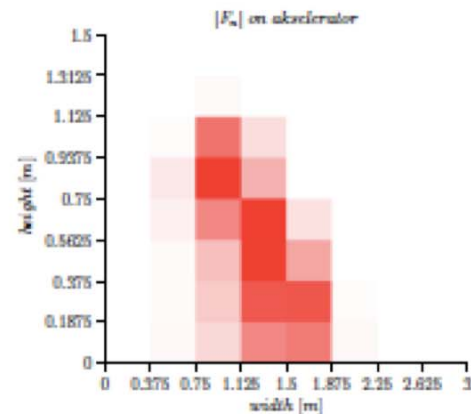
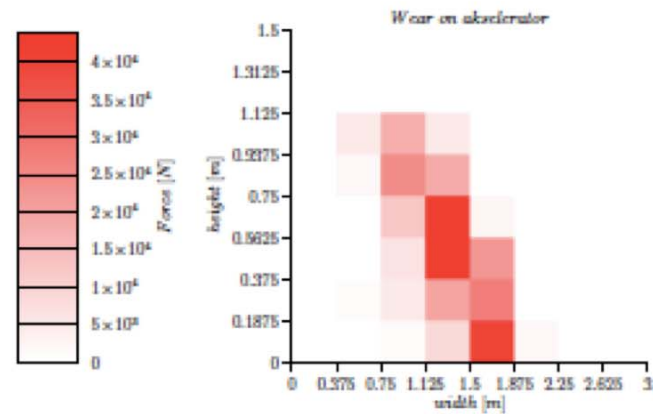
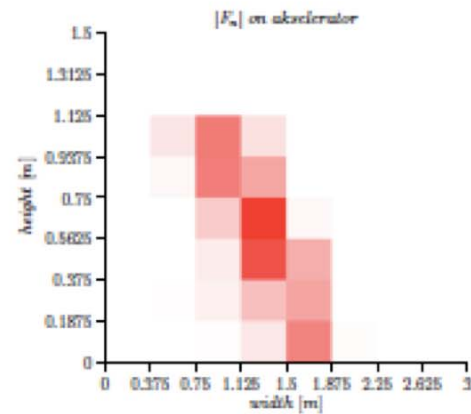
(e) 10 seconds



(f) 11 seconds



Fördelning av
normalkrafter och
nötning på
akselatorn vid
tiderna 1, 5 och 10 s





Totala normalkrafter
på de olika ytorna
som funktion av tiden

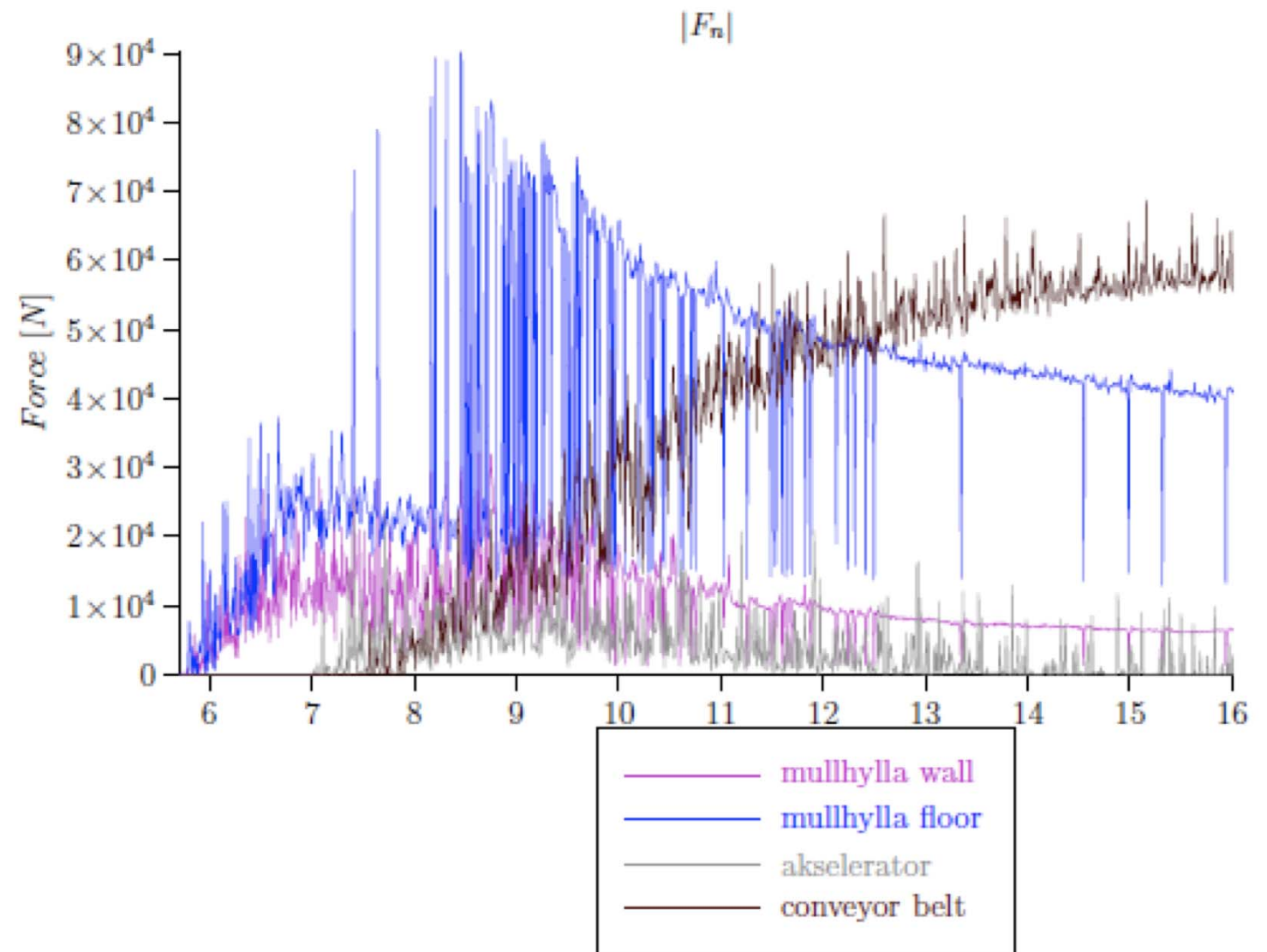


Figure 3: Magnitude of normal forces over time.



Resultat

Totala nötning på de olika ytorna som funktion av tiden

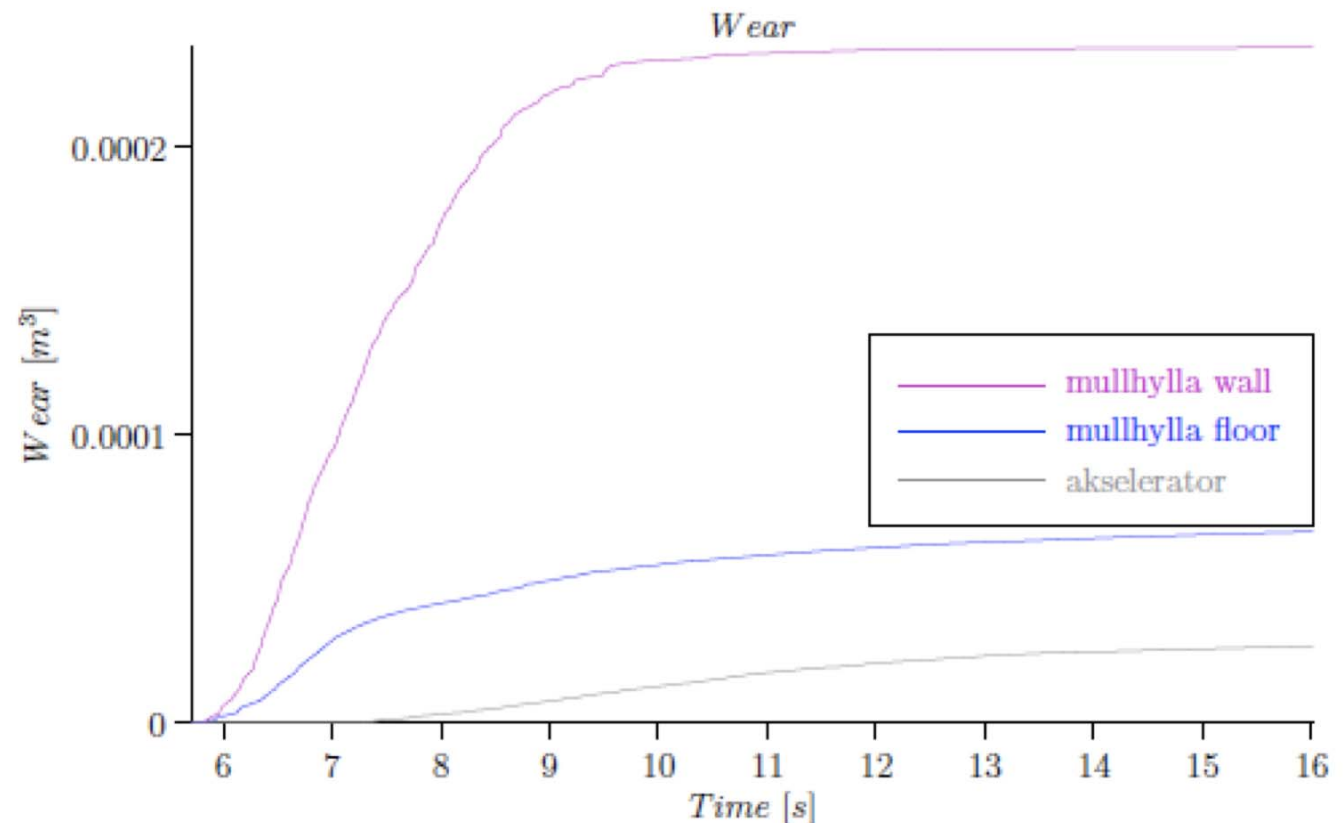


Figure 4: Wear over time.

OBS! Nötningssmodellen måste ersättas med en som är relevant för de aktuella materialen och nötningmekanism.

Nötning över tiden på det ytelement i mullhyllan som är mest utsatt

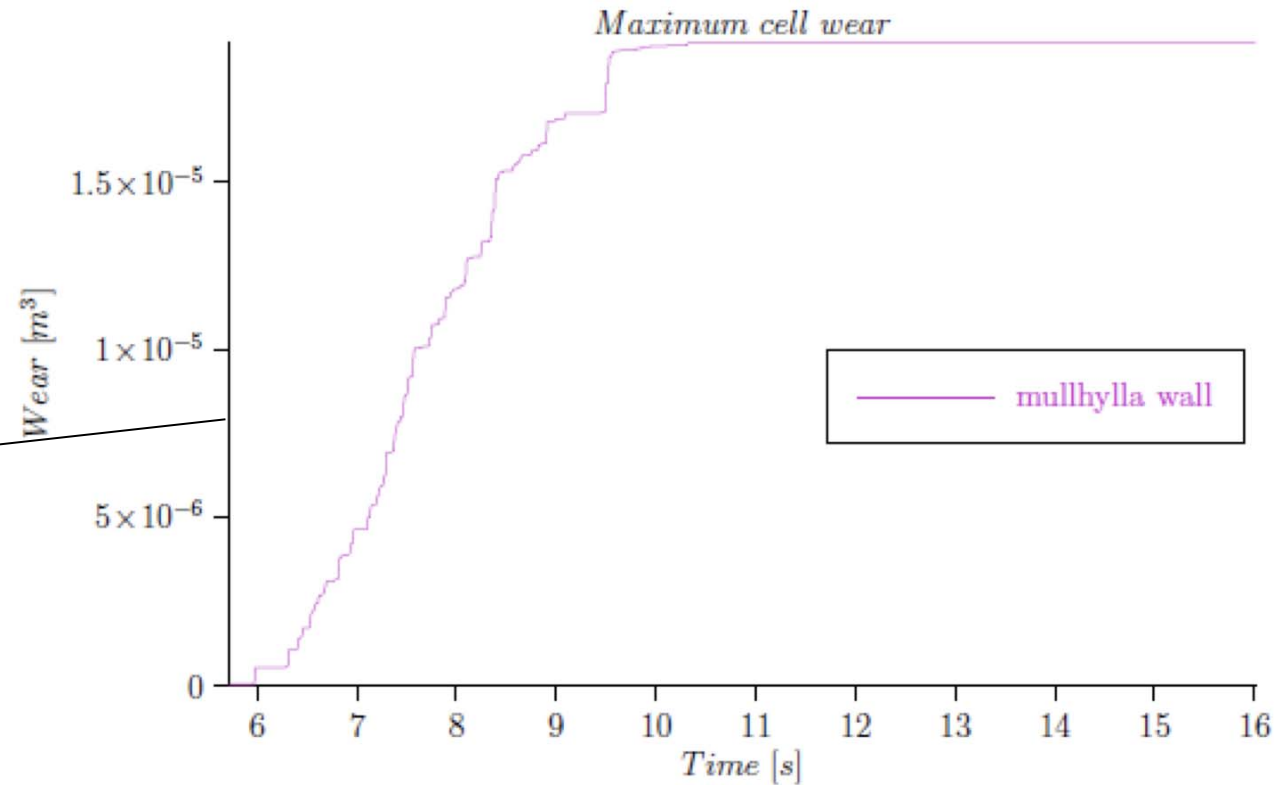
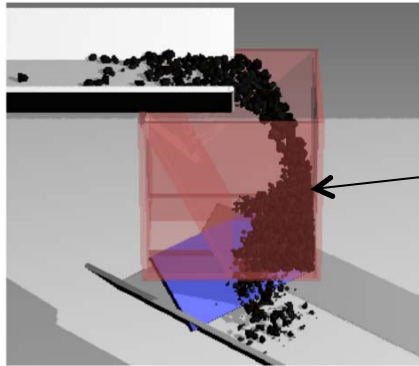


Figure 23: Accumulated wear over time on the cell on mullhylla which has the maximum wear.



Prestanda

2.500 oregelbundna stelkroppar

Ca 25.000 kontakter

Ca 75.000 kopplade ekvationer (MLCP) att lösa varje tidssteg

Simulering med 10 ms tidssteg – video:

http://umit.cs.umu.se/modsimcomplmech/videos/JohnNordberg_conveyor.avi

1 s förlopp tar ca 60 s att beräkna

Lösare vidareutvecklas sedan detta och optimerats ytterligare (10 ggr snabbare)

--> även med ökat antal kroppar (100K) och längre tidsförlopp är det realistiskt att 10-100 körningar om dagen för att på rimligt kort tid finna design som är optimalt konstruerad ur nötningshänseende



Nästa steg

Om intresse finns vill vi ta fram simuleringsverktyg som stöder design och konstruktionsarbetet för transportörsystem.

Det sker rimligtvis tillsammans med systemleverantör – som är trolig användare av sådant verktyg.

Verktyg:

- stöd för att läsa in/skapa CAD-modell av system
- stöd för att definiera material på transportör
- simulering
- post-processering, analys och visualisering av data från simulering
- stöd för att optimera design med avseende på nötning och materialflöde

Kan baseras på SpaceClaim och AgX Multiphysics Toolkit + analys- och optimeringsstöd



Detaljer kring nonsmooth DEM / nonsmooth contact mechanics – nästa slide

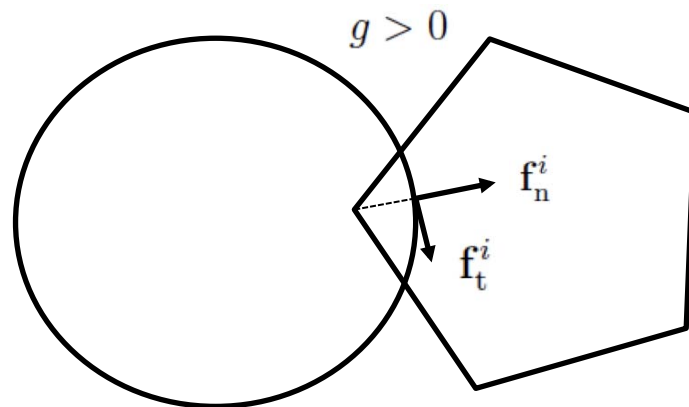


Nonsmooth contact force

Nonsmooth DEM contacts $h > t_{DEM}$

Contact law (Signorini-Coulomb-Newton) $\text{law}_{SC}[\mathbf{u}^{i+1}, \mathbf{r}^{i+1}] = \text{true}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_n^+ &= -e\mathbf{u}_n^- & \mathbf{f}_n &\geq 0 & , & \mathbf{u}_n &\geq 0 & , & \mathbf{f}_n \cdot \mathbf{u}_n &= 0 \\ \mu|\mathbf{f}_n| &\geq |\mathbf{f}_t| & , & |\mathbf{u}_t|(\mu|\mathbf{f}_n| - |\mathbf{f}_t|) & & , & \mathbf{f}_t^T \mathbf{u}_t &= -|\mathbf{f}_t||\mathbf{u}_t| \end{aligned}$$



Vid varje tidssteg beräknas de krafter som är nödvändiga för att uppfylla de geometriska villkoren att kropparna ej skall penetrera och att friktionen uppfyller Coulombs lag.

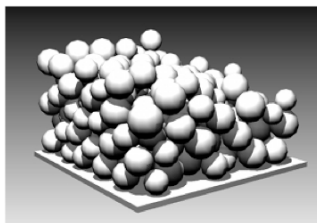


Nonsmooth contact solver

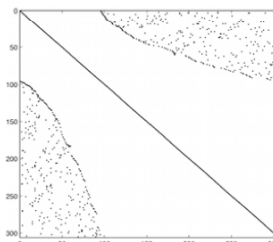
För stora system med många kroppar leder det till att vid varje tidssteg lösa
Mixed linear complementarity problem

$$\begin{aligned} Hz + b &= w_+ - w_- \\ 0 \leq z - l \perp w_+ &\geq 0 \\ 0 \leq u - z \perp w_- &\geq 0 \end{aligned}, \quad H = \begin{bmatrix} M & -G^T \\ G & 0 \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} v^{i+1} \\ \lambda^{i+1} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} -Mv_{free} \\ 0 \end{bmatrix}$$

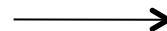
Lösningen är de hastigheter och krafter som är konsistenta med de geometriska kontaktvilkoren samt de externa krafter som finns, tex gravitation



Stela kroppar



Matrisen H



Lösningen är ett nätverk av kontaktkrafter λ

Matematiskt kan ett fordon och robot modelleras på samma form. Matrisen H ser lite annorlunda ut bara