

Utveckling och framtagning av vindsiktprototyp

Kandidatarbete inom Produkt och Produktionsutveckling (Maskinteknik)

MARCUS ANDERSSON
ANDREAS BÖRJESSON
TOBIAS JUNGBARK
PETTER LIEBERG

Institutionen för Produkt- och Produktionsutveckling
Avdelningen för Rock Processing Research
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2008
Kandidatarbete 2012:03

Sammanfattning

Detta projekt genomfördes som ett kandidatarbete med syfte att ta fram en vindsiktsprototyp. Vindsiktning är en teknik som används för att klassera olika material med avseende på storlek eller vikt med hjälp av luftström. I detta projekt applicerades tekniken på krossad sand för att ta bort fina partiklar ur sanden. En hög andel fina partiklar, med en storlek under 63 μm , ger sämre egenskaper hos betongen då den krossade sanden skall användas till detta.

På många stenbrott där vindsiktning används idag arbetar vindsiktarna med externt luftflöde, vilket innebär att det sker ett luftutbyte mellan vindsikten och omgivningen. Externt luftflöde medför risken att de fina partiklarna, som är skadliga att andas in, läcker ut i omgivningen. Därför har projektet bland annat avgränsats till att ta fram en prototyp som jobbar med internt luftflöde för att förhindra läckage av fina partiklar.

Innan framtagning av prototyp krävdes kunskap, som tillförts genom att studera existerande lösningar för klassering av partiklar. Även grundläggande kunskaper inom strömningsmekanik har krävts. Genom systematiska konceptgenereringsmetoder har sedan flertalet lösningar tagits fram och utvärderats med hjälp av beräkningar och flödessimuleringar i dator (CFD). Utifrån utvärdering av de genererade koncepten, samt resultat av beräkningar och simuleringar, har ett slutgiltigt koncept valts för tillverkning av prototyp.

På den färdiga prototypen utfördes luftflödesmätningar för att verifiera om luftflödet betedde sig som förväntat. Dessa mätningar gav dock resultat av olika grad av pålitlighet, då mätinstrumentet gav väldigt fluktuerande värden. Det utfördes också tester med sand, där mängden av de olika partikelstorlekarna i inmatningssanden utförligt kontrollerades både före och efter vindsiktning i prototypen.

När testerna med sand utförts kunde effektivitetskurvor för vindsikten ritas för att se var den så kallade skärningspunkten låg. Det bästa noterade testet lyckades få ner andelen av de minsta partiklarna från cirka 14 % till cirka 5 %, med en skärningspunkt på 0.118 mm. Det behöver dock göras fler och utförligare tester för att kunna verifiera samband mellan effektiviteten på vindsikten och olika luftflöden.

Abstract

This project was executed as a bachelor thesis whose purpose was to result in an air classifier prototype, for science research. Air classification is a technique that is used to sort particulate material, into two or more products, based on size or weight by using an air stream. In this project, the technique is applied to sort manufactured sand. When the sand is used for concrete, a high content of fine particles will result in poorer qualities. Therefore air classification is used to remove the fine particles.

On many quarries, where air classification is used, the air classifiers are using an external air flow system, which means that there is an exchange of air between the air classifier and its surroundings. This exchange means that there is a risk of fine particles, injurious for one's respiratory system, to leak out. That is one reason why this project aims to build an air classifier prototype, which uses an internal air system, to reduce the leakage of fine particles.

Before the process of developing a prototype could start, some knowledge and insight on the topic was required. Therefore different, existing solutions on the matter of classifying particles were studied. Fundamental knowledge in the area of fluid dynamics was also needed. Through systematic concept generating methods, several concepts have been created. These concepts have then been evaluated through calculations and fluid simulations in computer (CFD). From the evaluations a final concept has been chosen, for production of a prototype.

When the prototype was built, air flow measurements were done to see if the airflow behaved as expected. However, these measurements did not give reliable results, since the measuring instrument gave very fluctuating values. Tests were also performed with sand. The sand and its proportions of different particle sizes were thoroughly measured before and after air classification.

After the tests with sand, classification efficiency curves could be drawn to see where the, so called, cut-size were situated. The test with best results managed to decrease the proportion of the smallest size particles from around 14% to 5%, where the cut-size could be determined at 0.118mm. However, more tests are needed to verify the correlation between the efficiency and the air flow.

Innehållsförteckning

| | | |
|------|--|----|
| 1 | Inledning..... | 1 |
| 1.1 | Bakgrund till projektet..... | 2 |
| 1.2 | Syfte..... | 2 |
| 1.3 | Problemspecifikation..... | 2 |
| 1.4 | Avgränsningar..... | 3 |
| 1.5 | Metod..... | 4 |
| 2 | Teori..... | 5 |
| 2.1 | Vindsiktning av stenkrossmaterial..... | 5 |
| 2.2 | 3D-modellering och datorsimuleringar..... | 6 |
| 2.3 | Mätutrustning för lufthastighet..... | 7 |
| 2.4 | Siktning med siktdäck..... | 8 |
| 2.5 | Skärningspunkt..... | 8 |
| 3 | Metod..... | 9 |
| 3.1 | Identifiering av problem..... | 9 |
| 3.2 | Kravspecifikation..... | 9 |
| 3.3 | Generering av tänkbara koncept..... | 9 |
| 3.4 | Urvalsprocess..... | 10 |
| 3.5 | Utveckling av valt koncept..... | 10 |
| 3.6 | Konstruktion och tillverkning av utvecklat koncept..... | 10 |
| 3.7 | Utvärdering och tester på prototypen..... | 11 |
| 4 | Resultat..... | 12 |
| 4.1 | Beskrivning av befintliga klasseringsmetoder för vindsiktat..... | 12 |
| 4.2 | Beräkningar av luftflöde för dimensionering av fläkt..... | 14 |
| 4.3 | Kravspecifikation för demonstrationsobjektet..... | 17 |
| 4.4 | Konceptgenerering med hjälp av Morfologisk matris..... | 19 |
| 4.5 | Genererade koncept..... | 20 |
| 4.6 | Urvalsprocess för minska antalet koncept (Pugh-matris)..... | 24 |
| 4.7 | CFD-simulering av koncept 1 och koncept 3.1 för analys i Pughmatris..... | 26 |
| 4.8 | Urvalsprocess för att välja ett slutgiltigt koncept (viktningsmatris och Kesselringmatris).... | 28 |
| 4.9 | Utveckling av valt koncept..... | 30 |
| 4.10 | Tillverkning och detaljkonstruktion..... | 34 |
| 4.11 | Färdig prototyp..... | 40 |
| 4.12 | Luftflödesmätningar i trumma och utloppsrör..... | 42 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.13 | Test med maskinsand i vindsiktsprototypen..... | 47 |
| 4.14 | Analys av resultat | 55 |
| 5 | Diskussion..... | 56 |
| 5.1 | Fläktens rotationsflöde..... | 56 |
| 5.2 | Mätningar av luftflöde i vindsiktsprototypen | 56 |
| 5.3 | Tester med maskinsand i vindsiktsprototypen | 57 |
| 5.4 | Konstruktion och tillverknings aspekter | 58 |
| 5.5 | Tid och väder | 58 |
| 6 | Slutsats | 59 |
| 6.1 | Svårstyrd fungerande prototyp..... | 59 |
| 6.2 | Innovativ utformning..... | 59 |
| 6.3 | Reducera fina partiklar som cirkulerar i systemet..... | 59 |
| 6.4 | Utföra fler och mer utförliga tester | 59 |
| 6.5 | Ytterligare rekommendation för tillverkning | 60 |
| | Källförteckning..... | 61 |
| | Appendix | A |

1 Inledning

Natursand är en viktig beståndsdel i betong och asfalt, men även avgörande för den naturliga reningen av grundvattnet. Stora mängder natursand förbrukas årligen av betongindustrin vilket bidrar till en sämre rening av grundvattnet. Sverige vill säkerställa att framtida generationer skall ha rent grundvatten och därför instiftades 1999 ett miljömål för att minska uttaget av natursand. Natursand är en ändlig resurs och skapades under istiden när stora isblock rörde sig och malde ner berg och sten, som sedan förfinats ytterligare genom naturlig erosion.

Betongindustrin står idag för ca 50 procent av uttaget av natursand i Sverige och är därmed i behov av att minska sitt uttag. För att göra det måste Sveriges bergmaterialindustri producera en produkt som är likgiltig natursanden till detta ändamål. Maskinsanden är en sådan produkt och framställs genom att krossa sten. Maskinsand har dock inte samma egenskaper som vanlig natursand. Natursanden har en rundare form och innehåller knappt några fina partiklar på grund av miljontals år av naturlig slipning och filtrering, vilket medför både för- och nackdelar. Den runda formen bidrar till att betong med natursand lättare flyter ut i formen än betong med oregelbunden maskinsand. Maskinsandens oregelbundna form ger däremot en större mantelyta som ökar bindningen i betongen. Detta tillsammans med att de oregelbundna kornen lättare hakar i varandra gör att maskinsand i betong kan ge högre hållfasthetsegenskaper. Denna aspekt är ytterligare en anledning till att betongindustrin är intresserade av maskinsand.

Krossat bergmaterial ger maskinsand bestående av 15-25 massprocent [1] fina partiklar som är mindre än 63 mikrometer. Dessa fina partiklar har en högst avgörande roll på betongens tryck och böjhållfasthetsegenskaper. Försök har gjorts av *Celik och Marar* [2] som visar att optimal mängd av fina partiklar ligger kring 5-10 massprocent för maskinsand. Optimeringen av massprocenten varierar beroende på vilken typ av bergmaterial och partikelstorlek som används, men likvärdigt för alla olika typer är att andelen fina partiklar måste reduceras.

Vindsiktning är en metod som kan användas för att reducera halten av fina partiklar i maskinsand genom att sortera partiklar efter kornform, storlek och densitet. Detta görs genom att en samlad massa av tyngre och lättare partiklar tvingas att passera en luftström. De mindre partiklarna följer då med luftströmmen och de större faller oftast ner i en sorts behållare. Ut ur detta fås två eller fler sorterade massor. På grund av luftturbulens och kollisioner mellan partiklar så är inte sorteringen fullständig utan en viss blandning av partikelstorlekar kommer att ske. Vindsiktens effektivitet beror således på hur väl partikelstorlekarna fördelas.

1.1 Bakgrund till projektet

Chalmers Rock Processing Research är en del av institutionen för *Produkt och Produktionsutveckling* på *Chalmers Tekniska Högskola*. De bedriver forskning och utveckling kring maskiner och processer för produktion av bergmaterial (ballast, mineral och gruvindustri). I forskningssyfte önskar de en vindsiktsprototyp för att genomföra tester på och ha som demonstrationsobjekt. Handledare för projektet är *Robert Johansson, Licentiate of Engineering* och examinator är *Magnus Evertsson, biträdande Professor*.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att utveckla ett koncept för en vindsikt som sorterar bort fina partiklar, mindre än 63 mikrometer, ur en maskinsand. Utgångspunkten är att detta ska ske med ett internt och spiralformat luftflöde. Till detta koncept skall en prototyp tillverkas för att verifiera konceptets funktion. Utifrån analys och tester av prototypens funktionsduglighet kommer underlag för vidareutveckling tas fram. Detta konstruktionsunderlag ska resultera i att ett portabelt demonstrationsobjekt tillverkas, vilket skulle möjliggöra vidare forskning och utveckling inom ämnet på Chalmers. Den slutgiltiga tillverkningen av demonstrationsobjektet ligger dock utanför projektets ramar och kommer sannolikt utföras av en verkstad på begäran av *Chalmers Rock Processing Research*.

1.3 Problemspecifikation

Problemet som skall lösas är att klassera maskinsand i två produkter, en fin och en grov, med hjälp av en modulärt uppbyggd vindsikt. Den grova produkten skall kunna ersätta natursand i bland annat betong och får därför inte innehålla för stora mängder fina partiklar. Problemet har brutits ner i delproblem, vilka har identifierats till följande:

- *Inflöde av och portionering av partiklar* – I vilka mängder och på vilket sätt som sanden kommer att matas in i vindsikten, samt hur de fördelas. Förhållandet mellan inflöde av sand i vindsikten och det cirkulerande luftflödet kommer vara viktigt att balansera för att erhålla en hög prestanda, det vill säga hög grad avskiljning av fina partiklar från den grova sandmassan. Utifrån krav och önskemål på vindsiktens kapacitet kommer beräkningar att utföras för att dimensionera vindsiktens storlek, samt dess förhållande mellan sand- och luftflöde.
- *Fördelning av partiklar inne i vindsikten* – Hur partiklarna ska få en fördelaktig spridning inne i vindsikten för att luftströmmen lättare ska kunna fånga den enskilda partikeln och på så sätt erhålla en hög avskiljningsgrad. En bra spridning skulle även kunna leda till en högre kapacitet eftersom en större del av vindsikten utnyttjas. Beroende på hur problemet löses kommer även inloppets placering att bestämmas.
- *Skapa luftflöde* – På vilket sätt som det interna luftflödet skapas för att separera partiklarna. Luftflödet är naturligtvis det viktigaste problemet att lösa. Utan luftflöde kommer inte vindsikten att fungera. Ett val av flödesgenererande anordning kommer att behöva göras. Dess placering samt hur flödet skapas kommer till stor del styra konceptets utformning. Strömningsberäkningar och tester kommer att behöva göras för att verifiera att det önskade luftflödet uppnås.
- *Klassering av små och stora partiklar* – Vilka geometrier och luftflöden som skall användas för att skapa en lämplig brytpunkt mellan olika klasser av partikelstorlekar. Brytpunkten beror till största del av luftflödets hastighet, vilken ger upphov till en lyftande kraft på partiklarna. Den lufthastighet som behövs kommer tas fram genom beräkningar, men även

verifieras genom tester. Det skulle vara önskvärt att kunna justera lufthastigheten för att på så sätt kunna justera brytpunkten.

- *Centrifugalkraftsgenerering* – Hur partiklarna hamnar i en spiralformad bana som förfinar klasseringen av partiklarna, samt hur denna bana skapas. Detta är starkt kopplat till hur luftflödet skapas och verkar i vindsikten. Utöver lyftkraften används centrifugalkraften till att fördela partiklar i den typ av vindsikt som projektet syftar till att behandla. Detta beskrivs utförligt senare i rapporten och kräver flödessimuleringar i dator för att undersökas.
- *Separering av fina partiklar från det interna luftflödets bana* – Eftersom luftflödet är internt och kommer att cirkulera i vindsikten krävs att de fina partiklarna avlägsnas från flödet för att inte transporteras tillbaka in i vindsikten. Kvalificerade antaganden uppbyggda på strömningsmekaniska principer tillsammans med verifiering i datorsimuleringar kommer att krävas för att lösa detta problem.
- *Utflöden av partikelansamlingar* – Hur de olika partikelansamlingarna förs ut ur vindsikten utan att påverka det interna luftflödet i systemet. Projektets syfte är bland annat att skapa en vindsikt med internt luftflöde. Genom att ha öppna in- och utlopp skulle det innebära ett utbyte av såväl luft som partiklar med omgivningen och systemet skulle då inte ha ett internt luftflöde.
- *Möjliggöra mätning av luftflödet* – Uttag för mätinstrument vid avgörande positioner för optimering av vindsikten samt för att ge underlag för vidare forskning inom ämnet på Chalmers.

Många av lösningarna till delproblemen kommer på ett eller annat sätt att vara motstridiga och kan ej uppfyllas samtidigt. Viktigt är därför att tillsammans med kunden skapa en gemensam bild av vilka kriterier som är viktigast för produkten. Dessa kriterier bör delas upp i krav, som måste uppfyllas, och önskemål med olika viktningar enligt prioriteringsgrad. Denna information sparas i en kravspecifikation att återkoppla till under projektets gång.

1.4 Avgränsningar

Framtagningen och utvecklingen av en vindsiktsprototyp görs för att vara ett hjälpmedel för forskning och demonstrering av denna teknik på stenbrott. De krav och önskemål som ställs på prototypen skiljer sig därför en hel del från en liknande kommersiellt gångbar produkt. Kundkrav och önskemål som ställs på prototypen är de som Robert Johansson, Produkt- och Produktionsutveckling vid Chalmers, ställer och någon större hänsyn tas därför inte till en marknad för liknande produkter.

Det är ett hälsoproblem med dammig miljö på stenbrott, då det är skadligt för människan att andas in små partiklar. Många vindsiktat arbetar idag med ett externt luftflöde, det vill säga att luft från omgivningen förs in i vindsikten, utför arbete och förs sedan ut i omgivningen igen. Det är då stor risk att partiklar följer med luften ut ur vindsikten, då avskiljningstekniken inte är hundra procentig. Dessa vindsiktat har ofta någon form av filter som måste bytas, vilket också gör det till en kostnadsfråga. I ett system som arbetar med ett internt luftflöde är det inget utbyte av luft och därmed mindre risk för partikelutsläpp. Därför avgränsas projektet till att utveckla ett koncept med internt luftflöde, för att förbättra arbetsmiljön på stenbrotten och för att sänka kostnaden.

Många av de befintliga vindsiktarna vid stenbrott använder sig av centrifugalflödeszon, dock oftast med externt luftflöde, vilket är en beprövad metod. Genom att ta fram ett koncept som låter det interna luftflödet konstrueras på så vis att den ger upphov till en centrifugalflödeszon kan sedan

prestandan jämförs med befintliga vindsiktare som har externt luftflöde. Ovanstående restriktioner kommer från *Robert Johansson*.

Prototypen anses inte vara till för massproduktion utan det kommer endast att tillverkas ett demonstrationsobjekt. På grund av detta kommer inte en omfattande livscykelanalys att utföras.

1.5 Metod

Projektets tillvägagångssätt följer de delsteg som är beskrivna i boken "*The Value Model, P.Lindstedt och J.Burenius, 2003,2006*". Denna metod är ett viktigt verktyg för att på ett systematiskt sätt ta fram och utveckla nya produkter och tjänster. Inledningsvis läggs fokus på att identifiera och bryta ner de olika problemen projektet ställs inför, för att sedan generera flera olika dellösningar på respektive delproblem på ett systematiskt sätt. Dellösningarna kombineras ihop till flera olika totallösningar. På så sätt minimerar man risken att på ett tidigt stadium förkasta eller missa bra totallösningar.

De olika totallösningarna analyseras, vidareutvecklas och svaga lösningar elimineras efterhand. Elimineringen går till genom att använda olika hjälpmedel i form av elimineringsmatriser, där totallösningarnas egenskaper jämförs mot varandra. Tillslut återstår ett koncept som vidareutvecklas genom analys, beräkningar och datorsimuleringar.

För att verifiera konceptets funktionsduglighet tillverkas en prototyp. Prototypen testas genom att göra luftflödesmätningar, samt klasseringstester med maskinsand. Resultatet av testerna analyseras och prototypens effektivitet samt dess prestanda konstateras. Utifrån detta kan beslut tas om huruvida konceptet ska vidareutvecklas eller inte.

2 Teori

I detta kapitel beskrivs teorier och den grundläggande kunskap som krävs för en god förståelse av de yttryck, beräkningar och tankesätt som används i rapporten.

2.1 Vindsiktning av stenkrossmaterial

Idag finns det flera olika typer av klasseringsmetoder för flera olika tillämpningar. Förutom för just stenkrossmaterial används vindsiktning för bland annat sortering av sopor, säd och industriavfall. Principen för vindsiktningsmetoder är att med en luft-, eller annan gasström, separera de ingående partiklarna i ett inmatningsmaterial, med avseende på kornform, storlek eller densitet.

För stenkrossmaterial önskas avskiljning av små partiklar vilket sker genom att en luftström fångar upp de små, lätta partiklarna och leder bort dessa. De tyngre partiklarnas tyngdkraft är för stor för att de ska följa med i luftströmmen. Det finns olika metoder att åstadkomma detta. Den metod som detta projekt har valt att rikta in sig mot är att kombinera tyngdkraftens inverkan med att låta luftströmmen vara spiralformad, i en cylinderformad trumma. När den spiralformade och uppåtriktade luftströmmen träffar sanden får de tyngre partiklarna störst centrifugalkraft och hamnar längst ut mot väggen i trumman. Alldeles intill väggen når partiklarna ett turbulent gränsskikt där hastigheten är lägre och när de träffar trummans vägg tappar de ytterligare hastighet och faller ner i ett utlopp i trummans botten. De lättare partiklarna följer med luftflödet, vilket leds ut i toppen av trumman.

För att få rätt skärningspunkt gäller det att balansera förhållandet mellan luftmotståndet på partiklarna med centrifugalkraften på partiklarna. Även tyngdkraften måste tas hänsyn till. Komposanten i vertikalled av luftmotståndet får inte överstiga tyngdkraften på de partiklar man vill ska hamna i den grova produkten. Dragkraften på en partikel i ett ostört luftflöde bestäms av följande ekvation [3]:

$$F_D = \frac{1}{2} * C_D * \rho_l * v^2 * A_p \quad (1)$$

Där: F_D är dragkraften på partikeln.

C_D är en dimensionslös dragkraftskoefficient, vilken i sin tur är en funktion av Reynoldstalet.

ρ_l är luftens densitet.

v är relativa hastigheten mellan partikeln och luftströmmen.

A_p är den projicerade arean på partikeln.

Genom att ändra hastigheten på luftflödet i en vindsikt kan således separationsstorleken varieras. Men i en vindsikt kommer turbulens och interagerande mellan partiklar uppstå, vilket gör att separationsstorleken inte bara bestäms av hastigheten på luftflödet.

Centrifugalkraften på partiklarna bestäms av följande ekvation:

$$F_C = \frac{m * v^2}{R} = m * \omega^2 * R \quad (2)$$

Där: F_C är centrifugalkraften.

m är massan på partikeln.

v är hastigheten på partikeln.

ω är vinkelhastigheten.

R är radien.

2.2 3D-modellering och datorsimuleringar

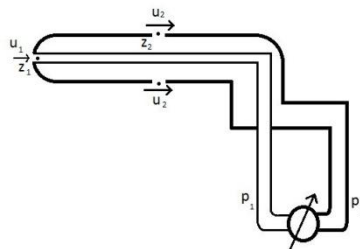
Konstruktion sker idag med hjälp av CAD-program (*Computer Aided Design*). Först görs en modell i 3D för att sedan projiceras ut vyer i 2D på speciella fördefinierade ritningsmallar. Då 3D-modellen modelleras upp fås en intuitiv känsla för hur själva delen ser ut. Dagens CAD-program har utvecklats till att inte enbart modellera delar utan även kunna montera ihop dessa i sammanställningar och bestämma hur dessa ska interagera med varandra. Det gör det möjligt att enkelt göra sammanställningsritningar och monteringsanvisningar. De större företagen som Autodesk och Dassault Systems har även olika inbyggda designfunktioner för att hjälpa konstruktören att designa, till exempel hållfasthetsmoduler för att se om konstruktionen håller.

Som underlag för val av koncept och fläkt användes förenklade CFD-beräkningar (*Computational Fluid Dynamics*) för att simulera olika flöden av vätskor och gaser efter Navier-Stokes ekvationer. Dessa beräkningar utgår oftast från en CAD-modell som man konverterat till ett format som programmet kan läsa av. Det vanligaste formatet är STEP-format vilket är ett generellt format för geometrier i 3 dimensioner. När sedan modellen importerats anges olika randvillkor för att styra flödet, till exempel för att erhålla en specifik hastighet vid en viss punkt. Nästa moment är att göra ett beräkningsnät, ett "mesh" med noder där ekvationerna löses. Konvergensen hos lösningen (den är approximativ) avgörs till stor del av hur fint nätet gjorts men ju mer noder nätet har desto längre tid tar det att göra beräkningarna. När en lösning som konvergerat till en given toleransnivå erhållits är simuleringen färdig.

CFD-beräkningar används som ett komplement till de urvalsmatriser som används vid konceptgenereringen. De koncept som anses ha potential modelleras och skickas till handledaren för projektet som då analyserar dessa i CFD-programmet Ansys Fluent 12.1.1. Input till de här beräkningarna är den vertikala hastigheten som krävs för att få en partikel att lyfta. Olika geometrier på spridningskåpa och inloppsror optimeras med CFD-beräkningarna.

2.3 Mätutrustning för lufthastighet

Mätning av lufthastighet i en vindsikt är viktigt för att säkerställa att hastigheten i maskinen håller sig inom önskvärt intervall för att säkerställa en klassering av det inmatade materialet. Det finns flera metoder som kan användas för mätning av lufthastigheter, alla metoder går ut på att någon form av mätutrustning placeras i området man vill utföra mätningen på. Mätutrustning som används i det här projektet är ett Prandtlrör. Ett Prandtlrör har två öppningar, en som är riktad mot det flödande mediet och en som är vinkelrät mot flödets riktning, se *figur 1*. Genom den öppning som är riktad mot flödet fås stagnationstrycket, det totala trycket, och genom den öppning som är vinkelrät mot flödet fås det statiska trycket i röret. På så sätt kan en tryckskillnad mellan det totala trycket och det statiska trycket mätas upp. Denna tryckskillnad gör det möjligt att räkna ut vilken hastighet mediet har med hjälp av Bernoullis ekvation. Prandtlröret stoppas alltså in i ett strömmande medium där man vill mäta hastigheten och genom en manometer mäts tryckskillnaden, ur detta kan sedan hastigheten hos mediet räknas ut.



Figur 1 - Prandtlrör

Bernoullis ekvation:

$$\frac{p_1}{\rho * g} + \frac{u_1^2}{2 * g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho * g} + \frac{u_2^2}{2 * g} + z_2 \quad (3)$$

$$p_1 = P_{\text{stagnation}}$$

$$p_2 = P_{\text{statiskt}}$$

Skillnaden mellan stagnationstrycket och det statiska trycket mäts med en manometer vilket är det dynamiska trycket

$$\Delta P = P_{\text{dynamiskt}} = P_{\text{stagnation}} - P_{\text{statiskt}} \quad (4)$$

$$u_1 = 0 \quad \text{stagnationshastigheten är alltid noll}$$

$$z_1 = z_2$$

Hastigheten u_2 blir då:

$$u_2 = \sqrt{2 \left(\frac{p_1}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} \right)} \quad (5)$$

2.4 Siktning med siktdäck

För att ta reda på hur stora fraktioner en mängd maskinsand består av kan en siktmaskin med flera siktdäck användas. Siktmaskinen i sig består av ett antal siktdäck och en vibrator, se figur 2.



Figur 2 - Siktmaskin med 8 siktdäck

Siktdäcken är placerade i en stående formation med ett antal nivåer av nätstorlekar där den största storleken är placerad längst upp och den finaste längst ned. Sanden som ska undersökas tillförs siktdäcken uppifrån och systemet sluts med ett lock. Med hjälp av gravitationskraften, vibrationer och sidorörelser rör sig sanden och silas ner igenom näten tills de på grund av sin storlek inte kommer igenom. På detta sätt samlas partiklar med samma storlek i nivå med varandra. Fraktionerna vägs sedan för att på så vis få hur stor andel respektive fraktion har. De olika fraktionerna som utvärderas vid siktning med skolans siktdäck är [x mm]:

| | | | | | | |
|-----------------|---------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|-------------|
| $0 < x < 0,063$ | $0,063 < x < 0,125$ | $0,125 < x < 0,25$ | $0,25 < x < 0,5$ | $0,5 < x < 1$ | $1 < x < 2$ | $2 < x < 4$ |
|-----------------|---------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------|-------------|

2.5 Skärningspunkt

Skärningspunkten för en vindsikt definieras som den punkt där effektivitetskurvan når 50 %. För att få fram effektivitetskurvan hos en vindsikt används ekvation 6, där X noterar fraktionsspännet på partiklarna. Fraktionsspännen är samma som används vid siktning med siktdäck. När alla fraktioner undersökts och erhållit en effektivitet plottas dessa mot X i log-skala.

Klasseringseffektiviteten för ett fraktionsspänn [2]:

$$\eta_x = \frac{\text{massa}_{\text{slutlig produkt}} * \text{slutlig produkts andel}_{\text{fraktion } x \text{ mm}}}{\text{massa}_{\text{inflöde}} * \text{inflödande produkts andel}_{\text{fraktion } x \text{ mm}}} \quad (6)$$

3 Metod

Projektets metod och tillvägagångssätt har varit förhållandevis reglerat och baserats på boken "*The Value Model, P.Lindstedt och J.Burenius*" [3]. Modellen beskriver ett systematiskt tillvägagångssätt för att säkerställa en konkurrenskraftig produkt med högt kundvärde. Genom hela processen ses förmågan till precision, snabbhet och nyskapande som förutsättningar för att lyckas och samtidigt skapa ett mervärde för intressenter i form av kunder, anställda och ägare. Metoden som *Value Model* beskriver innehåller flera delsteg, vilka beskrivs utförligt i detta avsnitt i den ordning som de används i projektet.

3.1 Identifiering av problem

Problemspecifikationen i det inledande kapitlet tas fram genom att olika befintliga lösningar undersöks för att se vad som eventuellt kan vara till nytta för projektet. Genom att söka på internet och i patentdatabaser kan olika delsystem till befintliga lösningar observeras. Funktionen de fyller analyseras för att få en djupare förståelse över grundläggande principer inom området vindsiktning. Genom att vikta de ingående funktionerna kan de mer viktiga funktionerna prioriteras.

3.2 Kravspecifikation

Kravspecifikationens huvuduppgift är att förse de inblandade parterna, så som användare och utvecklare, med en gemensam bild av hur produkten ska se ut och fungera. Dessutom är den användbar i prioritering av olika kriterium, samt lämplig att använda senare under testfasen där produktens funktionalitet jämförs med de fördefinierade kraven. De olika kriterierna som finns i kravspecifikationen delas upp i krav eller önskemål. Krav är kriterium som måste uppfyllas medan önskemålen prioriteras enligt olika viktningar. Till varje kriterium sätts ett målvärde samt en verifieringsmetod för att kunna undersöka att dessa uppfylls.

3.3 Generering av tänkbara koncept

Genom att analysera problemet och bryta ned det i flera delproblem, se kapitel 3.1, fås en överblick över vad som behöver lösas. Till varje delproblem genereras sedan flera olika lösningsförslag som sammanställs i en morfologisk matris. En morfologisk matris är ett verktyg som används vid konceptgenerering och innehåller systemets alla delproblem samt alternativa lösningar på dem. För att skapa en lösning till huvudfunktionen krävs en kombination av flera dellösningar. En lösning för varje delproblem väljs för att på detta sätt få ut ett fullständigt koncept som löser alla upptäckta delproblem. För att få ett stort antal koncept itereras denna process med olika kombinationer. Här gäller lagen att kvantitet leder till kvalitet.

Viktigt vid skapandet av dellösningarna är att inte uppfinna hjulet på nytt. Många av befintliga funktioner på tidigare system eller konkurrerande lösningar på marknaden kan återanvändas eller åtminstone förfinas. Dessa är sannolikt välbeprövade och medför en mindre arbetsbörda samt en låg teknisk risk.

Kan inte befintliga dellösningar återanvändas på ett lämpligt sätt kan man genom att implementera nya delsystem, komponenter, tekniker eller processteg erhålla ett högre kundvärde än tidigare system. Viktigt att påpeka är att ny teknik och nya lösningar kan medföra risker då dessa ännu inte är beprövade och kan ha såkallade barnsjukdomar som är svåra att kalkylera. Generellt sett har införandet av ny teknik stor potential att höja kundvärdet, men som följd att risker och svårigheter ökar.

3.4 Urvalsprocess

Urvalsprocessen består av att systematiskt sälla bort de totallösningar som skapades i den morfologiska matrisen till dess att endast det bästa konceptet återstår. Detta görs lättast genom att använda en Pughmatris och sedan en Kesselringmatris. I Pughmatrisen jämförs vart och ett av de genererade koncepten mot en referenslösning med avseende på vissa kriterier. På så sätt kan man få en bild över vilka svagheter och styrkor de olika koncepten har gentemot varandra. Valet av referenslösningen är fritt, men om möjligt bör en befintlig lösning som redan finns på marknaden eller ett koncept med goda möjligheter att lyckas, väljas. För att få ett säkert underlag kan denna process behöva itereras eftersom resultatet varierar beroende på vilken referenslösning som är vald. De koncept som inte håller måttet förkastas och mängden koncept minskas.

I Kesselringmatrisen sker en mer noggrann sällningsprocess där kriterierna viktas innan de jämförs med varandra. På så sätt får de kriterier, som är viktiga för projektet, en större genomslagskraft och de koncept som uppfyller dessa väl kommer värderas högt. Sämre lösningar förkastas till dess att endast ett koncept återstår. Detta är det slutgiltiga konceptet och ska vidareutvecklas.

3.5 Utveckling av valt koncept

För att optimera geometrin på det valda konceptet utfördes flödessimulering i ett CFD-program (*Computational Fluid Dynamics*). Underlag till CFD tas fram genom att 3D-modellera det valda konceptet i olika varianter. För att veta vilket luftflöde som flödessimuleringarna skall använda sig av utförs beräkningar i programvaran Matlab. När flödessimuleringarna för respektive variant är utförda analyseras resultaten och eventuella brister i konstruktionens geometrier ändras, för att sedan simuleras och utvärderas igen.

3.6 Konstruktion och tillverkning av utvecklat koncept

När den slutgiltiga geometrin fastställts görs en utförligare 3D-modell där hänsyn även tas till detaljer och tillverkningsbarhet. Utifrån denna 3D-modell tas tillverkningsunderlag fram, i form av ritningar, för att kunna tillverka en prototyp. Med hjälp av ritningarna tillverkas en prototyp i experimentverkstaden på Chalmers.

3.7 Utvärdering och tester på prototypen

Den färdiga prototypens prestanda behöver utvärderas fysiskt i form av mätningar. För att ta reda på vilka hastigheter luften har utförs tester med hjälp av Prandtlrör och manometer. Det är de roterande hastigheterna och medelhastigheten i vertikalled som är av intresse. Med hjälp av de roterande hastigheterna kan centrifugalkraften som sandpartiklarna utsätts för beräknas. Medelhastigheten i vertikalled tas fram för att bekräfta om partiklarna får tillräcklig lyftkraft. Testerna utförs dock utan inmatning av sand, vilket innebär att de efterföljande beräkningarna endast kan ge uppskattningar om hur sandpartiklarna rör sig.

Tester med maskinsand utförs med olika luftflöden för att kunna hitta samband mellan luftflöde och klasseringseffektivitet. Testsandens olika fraktioner av partikelstorlekar bestäms nogga före och efter vindsiktning med hjälp en siktmaskin. Klasseringseffektiviteten tas sedan fram med hjälp av data från siktresultatet.

4 Resultat

I detta avsnitt redovisas resultatet från marknadsundersökning, konceptgenerering, beräkningar och strömningssimuleringar. Vidare presenteras projektgruppens konceptförslag och en utvärdering på denna. Avslutningsvis redogörs vidareutvecklingsarbetet och tillverkning av prototypen. Resultaten beskrivs i kronologisk ordning.

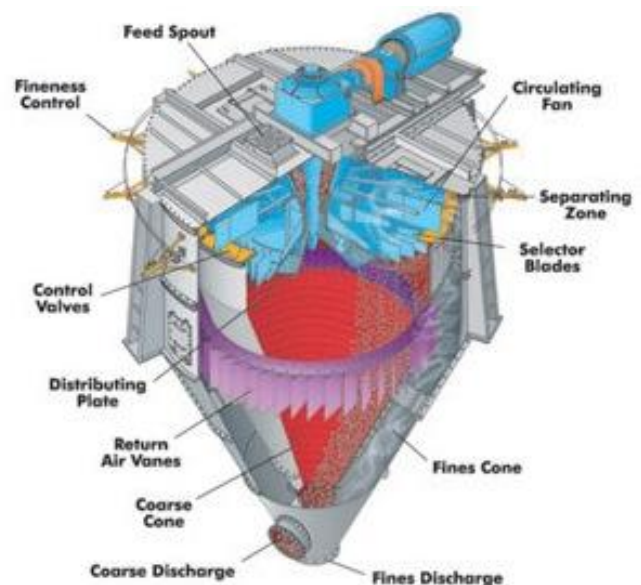
4.1 Beskrivning av befintliga klasseringsmetoder för vindsiktar

De lösningar som finns i dagsläget kan delas in i två olika typer, internt eller externt luftflöde. Med internt luftflöde menas att luften inte byts ut, utan är densamma hela tiden. Det enda som kommer in i den typen av vindsikt är det material som ska klasseras och är således det enda som kommer ut. Externt luftflöde innebär att luften hela tiden byts ut och tas således från omgivningen runt vindsikten. In kommer både sand och luft, ut kommer oftast grova partiklar för sig och luft blandat med fina partiklar. Båda typer har för och nackdelar. Vindsiktar med externt luftflöde separerar alltså inte små partiklar från luften vilket innebär att man behöver lösa det på annat sätt utan att det ska damma, oftast görs detta med stora cykloner eller med hjälp av filter. Vindsiktar med internt luftflöde dras alltid med risken att de minsta partiklarna inte kommer att separeras från luften utan fortsätta att cirkulera i vindsikten.

Dessa två typer av vindsikt fungerar på lite olika sätt beroende på vilken modell och tillverkare som utvecklats dem. De största leverantörerna av vindsikt är Sturtevant, Buell (som numera ägs av Metso) och Metso vilka har olika varianter av vindsikt som lämpar sig till olika applikationer.

4.1.1 Intern centrifugal-typ

Sturtevant har totalt 3 olika vindsikt, två med externt luftflöde och en med internt [8]. Den med internt luftflöde, kallad Whirlwind, se *figur 3* [5], utnyttjar både centrifugalkraften och gravitationskraften för att separera partiklarna. En fläkt bildar ett cirkulerande och vertikalt flöde som partiklarna hamnar i. Stora partiklar kommer att få en större centrifugalkraft än små och kommer därför att få en större radiell hastighet och därmed träffa väggen snabbare än de små. När de stora partiklarna träffar en vägg förlorar de energi och tack vare att hastigheten är noll vid väggen (no-slip villkoret) kommer partiklarna inte att följa med det vertikala flödet uppåt. Det vertikala flödet gör så att små partiklar följer med luftflödet och hamnar i ett annat fack för att sedan med hjälp av turbulens och en stor areaskillnad separeras från luften och cykeln har slutits.



Figur 3 - Whirlwind med internt luftflöde, [5]

4.1.2 Extern centrifugaltyp

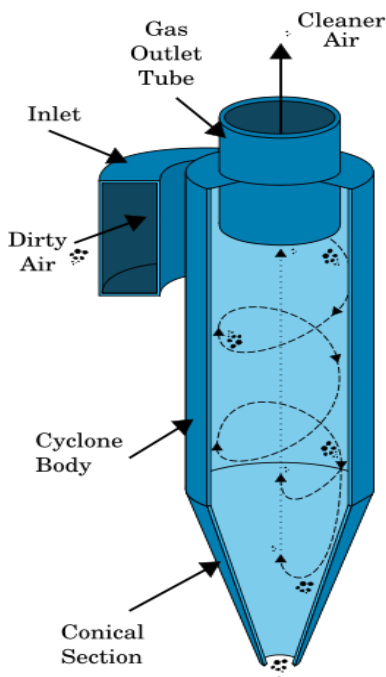
En av Metsos vindsiktar med externt luftflöde, se *figur 4* [6], bygger på centrifugalkraftens verkan på stora och små partiklar [9]. Stora och små partiklar flödar tillsammans med luft in och separeras delvis från luften när inloppsbanan kröker sig. Luften träffar sedan partiklarna och för med sig de flesta små partiklarna i en spiralformad bana ut ur vindsikten. De som inte följer med träffas tillsammans med de grövre av ett andra luftflöde som för tillbaka de små partiklarna till den spiralformade banan. Grova partiklar faller ner på grund av tyngdkraften.

4.1.3 Extern tyngdkraftstyp

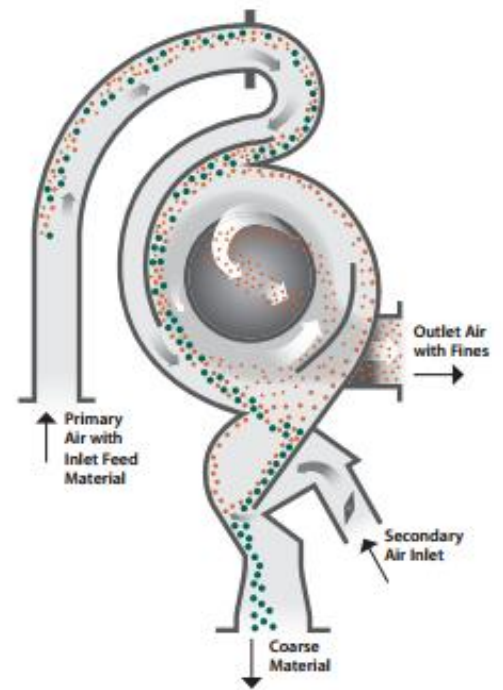
Den här typen av vindsiktar, *figur 5* [6], bygger endast på att massan hos de stora partiklarna gör att tyngdkraften på dessa är större än kraften som partiklarna utsätts för då en luftström träffar dem. De lätta partiklarna (som har låg tyngdkraft) kommer alltså följa med luftströmmen ut ur vindsikten medan de stora åker till botten. Metso har även en vindsikt av den här typen, här leds luftströmmen in från sidan och träffar partiklarna för att sedan riktas snett uppåt med hjälp av ett spjäll.

4.1.4 Cyklonrening

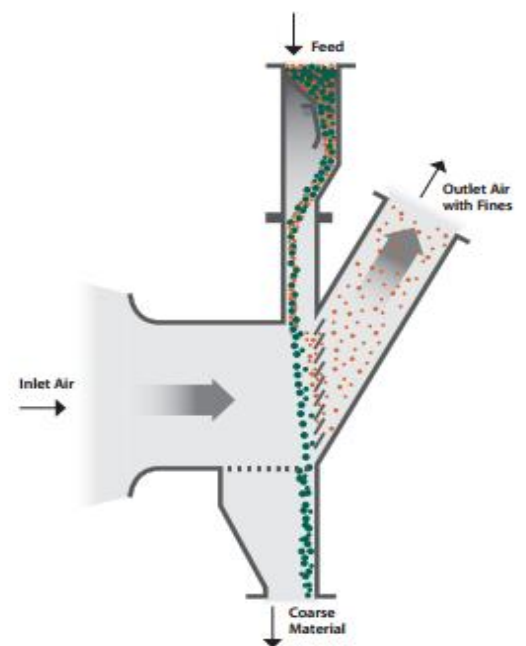
En annan teknik som har studerats är cykloner, se *figur 6* [7]. Tekniken används bland annat i applikationer för rökgasrening och dammsugare [6]. Rökgaser innehåller ofta en hög andel stoft som behöver avskiljas. Detta görs i ett första steg genom att leda in rökgaserna med stoft tangentiellt i toppen av en cirkulär trumma. I trumman bildas en virvel där tröghetskrafter och centrifugalkrafter gör att stoft hamnar längs trummans vägg och faller ner mot ett utlopp. Rökgaserna, utan stoft, leds oftast ut i centrum i toppen av trumman genom ett hål. Med så kallade multicykloner brukar en verkningsgrad kring 95 procent uppnås [8].



Figur 6 - Cyklonrening [7]



Figur 4 – Metsos centrifugaltyp, [6]



Figur 5 - Metsos vindsikt av tyngdkraftstyp, [6]

4.2 Beräkningar av luftflöde för dimensionering av fläkt

Det som avgör om partiklarna separeras eller ej är främst kraftjämvikten i vertikalled mellan gravitationskraften och dragkraften från den strömmande luften. Denna kraftjämvikt ger med lite förenklingar tillslut en hastighet på luften. När väl hastigheten fått fram kan flödet beräknas vilket står som grund för val av fläkt. För att försäkra sig om att fläkten ger en tillräckligt hög hastighet räknas på värsta tänkbara scenario.

Formeln för den dragkraft som en partikel utsätts för då den befinner sig i en strömmande fluid lyder:

$$F_D = \frac{1}{2} * C_D * \rho_l * (v_l - v_p)^2 * A_p \quad (7)$$

Där v_p är partikelns hastighet, v_l är luftens hastighet, A_p är partikelns projicerade area vertikalt mot flödet, faktorn C_D beror på partikelns geometri och Reynoldstalet. Med Newtons andra lag ($F = m * a$) kommer partikeln att få en acceleration a_p av denna kraft:

$$a_p = \frac{C_D * \rho_l * (v_l - v_p)^2 * A_p}{2 * m} \quad (8)$$

Partiklarna kommer sluta att accelerera när de uppnått samma hastighet som luften om inga andra krafter verkar på partiklarna. Eftersom massan är liten på partiklarna kommer de uppnå luftens hastighet väldigt fort, därför kan man med god approximation säga att partiklarna kommer att ha samma hastighet som luften.

Ansätt nu relativhastigheten $v_{rel} = v_l - v_p$. Löser man då ut v_{rel} ur ekvation 7 får man följande uttryck:

$$v_{rel} = \sqrt{\frac{2 * F_D}{C_D * \rho_l * A_p}} \quad (9)$$

Det antas vara turbulent strömning i trumman på grund av den komplexa geometrin och det roterande flödet. Två partikelgeometrier beaktas, kubiska och sfäriska. Den geometri som erhåller högst hastighet blir den dimensionerande vid val av fläkt.

För att vara säker på att så många som möjligt av partiklar under 63 mikrometer sorteras bort sätts referenslängden till 125 mikrometer. Den dragkraft som minst krävs då för att en sfärisk partikel med diameter $d = 125 * 10^{-6} [m]$ ska kunna lyfta ges av den vertikala kraftjämvikten (figur 7), vilket ger en kraft som minst måste vara på:



Figur 7 - Kraftbalans på en partikel i vertikalled

$$F_{D,sfar} = \frac{4 * \pi * d^3 * \rho_{partikel} * g}{12} = \frac{4 * \pi * (125 * 10^{-6})^3 * 2700 * 9.81}{12} = 2.71 * 10^{-008} [N] \quad (10)$$

Motsvarande dragkraft för en kubisk partikel med sidlängd $s = 125 * 10^{-6} [m]$ fås som:

$$F_{D,kub} = s^3 * \rho_{partikel} * g = (125 * 10^{-6})^3 * 2700 * 9.81 = 5.17^{-8} [N] \quad (11)$$

C_D för en kubisk partikel i turbulent strömning är 1.07 och för en sfärisk partikel 0.2.

A_p för en kubisk partikel med sidlängd $s = 125 * 10^{-6}$ ges av:

$$A_{p,kub} = s^2 = (125 * 10^{-6})^2 = 1,56 * 10^{-8} [m^2] \quad (12)$$

Motsvarande för en sfär med radie $r = 125 * 10^{-6}$ blir:

$$A_{p,sfär} = \pi * r^2 = \pi * (125 * 10^{-6})^2 = 1,23 * 10^{-8} [m^2] \quad (13)$$

Nu kan den relativa hastigheten v_{rel} ovan räknas ut för en sfär respektive en kub. Den relativa hastigheten som krävs för att en kub ska lyfta blir då:

$$v_{rel,kub} = \sqrt{\frac{2 * F_{D,kub}}{C_{D,kub} * \rho_l * A_{p,kub}}} = \sqrt{\frac{2 * 5,17 * 10^{-8}}{1,07 * 1,2 * 1,56 * 10^{-8}}} = 2,27 [m/s] \quad (14)$$

Och motsvarande hastighet för en sfär blir:

$$v_{rel,sfär} = \sqrt{\frac{2 * F_{D,sfär}}{C_{D,sfär} * \rho_l * A_{p,sfär}}} = \sqrt{\frac{2 * 2,71 * 10^{-8}}{0,2 * 1,2 * 4,91 * 10^{-8}}} = 4,29 [m/s] \quad (15)$$

$v_{rel,sfär}$ är alltså den största lufthastighet v_l som krävs för att en partikel ska vara i jämvikt. Med andra ord har vi:

$$v_p = v_l - 4,29 \quad (16)$$

Om lufthastigheten blir lägre än $v_{rel,sfär}$ kommer partikeln att få en negativ hastighet och därmed falla nedåt och om den blir högre kommer den att vara positiv och därmed åka uppåt. Fläkten dimensioneras alltså med hänsyn tagen till denna faktor.

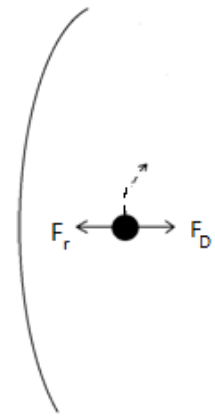
Eftersom vi inte med säkerhet kan beräkna hastighetsprofilen i trumman antas att vi har samma vertikala hastighet över hela tvärsnittet i trumman, det vill säga 4.29 m/s. Den här hastigheten ger följande flöde med trummans radie $r = 0,25$:

$$Q = 3600 * \pi * r^2 * v_{sfär} = 3600 * \pi * 0,25^2 * 4,29 = 3032,4 [m^3/h] \quad (17)$$

Fläkten måste alltså minst generera detta flöde.

Stora partiklar kommer att slungas ut radiellt betydligt snabbare än små partiklar på grund av att centrifugalkraften F_c är större hos dessa än vad den är på de små partiklarna, vilket den kommer vara då hastigheten v hos de större partiklarna är större. Detta ger kraften $F_r = F_c$ i radiell led:

$$F_r = \frac{m * v^2}{r} \quad (18)$$



Figur 8 - Kraftjämvikt för partikel i roterande flöde

Ger med Newtons andra lag ($F=m*a$):

$$a_r = v_r^2 / r \quad (19)$$

Partiklarna kommer också att påverkas av en motriktad kraft från luftmotståndet i radiell led (se figur 8), vilken ges av formeln ovan. Om a_r bryts ut efter att Newtons andra lag i horisontal led applicerats fås:

$$a_r = \frac{v^2}{r} - \frac{C_D * \rho_l * v_r^2 * A_p}{2 * m} \quad (20)$$

a_r kommer alltså att vara större för de tyngre partiklarna då massan m beror av radien i kubik och A_p beror av radien i kvadrat. Under förutsättning att tiden som partiklarna kommer att accelereras upp till jämviktshastigheten är väldigt kort spelar inte det så stor roll. När partiklarna väl uppnått jämviktshastigheten är a_r lika med noll, löses då v_r ut fås v_r till:

$$v_r = \sqrt{\frac{2 * m * v^2}{C_D * r * \rho_l * A_p}} \quad (21)$$

Här ses direkt att v_r kommer att vara större för de tyngre partiklarna. Dessa kommer alltså av två anledningar att slungas ut snabbare än de med liten massa.

4.3 Kravspecifikation för demonstrationsobjektet

Denna kravspecifikation är riktad till det demonstrationsobjekt som är tänkt att byggas efter det att konceptets prestanda verifierats genom tester på en fungerande prototyp. Krav och önskemål skiljer sig således för demonstrationsobjektet jämfört med prototypen. Givetvis tillverkas prototypen så att den i så stor utsträckning som möjligt ska efterlikna demonstrationsobjektet. Dock kommer kostnadsreducering och det faktum att endast konceptets prestanda ska verifieras medföra att prototypens storlek, materialval, livslängd och så vidare inte helt kommer överensstämma med kravspecifikationen.

Eftersom detta projekt avser ett demonstrationsobjekt i uppvisningssyfte, såväl som i forskningssyfte har konceptets funktion och prestanda värderas högt. Detta medför att kriterier så som varierbar skärningspunkt och luftflöde, för att kunna bestämma storleken på uppdelningen av sandpartiklarna, i stor utsträckning har styrt konceptets utformning och prioriteringar. Fysiska aspekter som storlek och vikt har därför anpassats efter prestandans behov. Så länge som dessa fysiska aspekter ligger inom rimliga gränser och möjliggör att demonstrationsobjektet kan transporteras på ett lämpligt sätt, läggs ingen större vikt på dessa. Däremot läggs stor vikt på att möjliggöra testtagning av vindsikten. Dels som verifikation på systemets prestanda, men även för att kunna trimma systemet och i forskningssyfte.

En viktig aspekt för detta projekt är att vindsiktens livslängd är så pass lång att den hinner visas upp på tillräckligt många stenbrott och användas i forskningen. För att säkerhetsställa detta krävs att delar som utsätts för högt slitage kan bytas ut, eftersom sandpartiklarna har en blästrande effekt som kan slita hål på metallkomponenter och förstöra packningar. Även känsliga komponenter som fläktar kan behöva bytas ut eftersom de små partiklarna lätt kan tränga in i motordelar och elektronik.

Då detta projekt avser en enstycksprodukt där kostnaden för energi är liten i förhållande till utvecklingskostnaden utgör en låg energikonsumtion inget vidare krav. Vid fortsatt utveckling och tillverkning av flera produkter krävs däremot en noggrann jämförelse mellan driftskostnader, kapacitet och prestanda för att säkerställa att vindsikten är ekonomiskt försvarbar.

Tabell 1 - Kravspecifikation för demonstrationsobjekt

| Kriterier | Målvärde | Krav eller önskemål | Vikt | Verifieringsmetod |
|--|---------------------|---------------------|------|-------------------------------------|
| Funktion | | | | |
| Klassering av maskinsand två varierbara produkter inom intervallet 0-2mm | | K | | Mätningar av slutprodukt i siktdäck |
| Klassera partiklarna i fler än två klasser | | Ö | 2 | Mätningar av slutprodukt i siktdäck |
| 1. Prestanda | | | | |
| 1.1 Maximalt materialflöde | >20kg/h | K | | Mätning |
| 1.2 Maximalt materialflöde | >200Kg/h | Ö | 1 | Mätning |
| 1.3 Massprocent fina partiklar med i den grova produkten | <5-10% | K | | Mätning av slutprodukt i siktdäck |
| 1.4 Massprocent fina partiklar med i den grova produkten | 0% | Ö | 5 | Mätning av slutprodukt i siktdäck |
| 1.5 Varierbart materialflöde inom givet intervall. | 10 Steg | K | | Produktplanering |
| 1.6 Varierbart materialflöde inom givet intervall. | 50 Steg | Ö | 2 | Produktplanering |
| 1.7 Varierbart luftflöde | 10 Steg | K | | Produktplanering |
| 1.8 Varierbart luftflöde | 50 Steg | Ö | 4 | Produktplanering |
| 2. Process | | | | |
| 2.1 Klassering genom centrifugalt luftflöde | | K | | Produktplanering |
| 2.2 Endast intern cirkulation av luftflödet | | K | | Produktplanering |
| 3. Miljö | | | | |
| 3.1 Få utsläpp av dammpartiklar | <0.1 kg/h | K | | Mätning |
| 3.2 Inga utsläpp av dammpartiklar | 0 kg/h | Ö | 5 | Mätning |
| 3.3 Energikonsumtion | < 200 kWh | Ö | 1 | Mätning |
| 3.4 Återvinningsbar | | Ö | 1 | Produktplanering |
| 4. Livslängd | | | | |
| 4.1 Livslängd | > 100 drifttimmar | K | | Verifiering av kund |
| 4.2 Livslängd | > 1000 driftstimmar | Ö | 3 | Verifiering av kund |
| 4.3 Service möjligheter och åtkomst inuti prototyp | | Ö | 5 | Produktplanering |
| 4.4 Utbytbara delar | | Ö | 5 | Produktplanering |
| 5. Tillverkningskostnad | | | | |
| 5.1 Materialkostnaden på produkten | <100 000 kr | K | | Produktplanering |
| 5.2 Materialkostnaden på produkten | <50 000 kr | Ö | 3 | Produktplanering |
| 6. Storlek | | | | |
| 6.1 Transporterbar på en area av 3mX2m | | K | | Produktplanering |
| 6.2 Anpassningsbar storlek i vertikalt led | >1m | Ö | 4 | Produktplanering |
| 6.3 Anpassningsbar storlek i radiellt led | >0,5m | Ö | 1 | Produktplanering |
| 7. Vikt | | | | |
| 7.1 Produktens vikt | < 600kg | K | | Vägning |
| 7.2 Produktens vikt | < 200kg | Ö | 3 | Vägning |
| 8. Estetik och yt-finish | | | | |
| 8.1 Estetiskt tilltalande, robust | | Ö | 3 | Utlåtande av kund |
| 9. Provtagningsmöjligheter | | | | |
| 9.1 Anpassad för insättning av mätutrustning av luftflöde | | K | | Produktplanering |
| 9.2 Inspektionsrutor | | Ö | 4 | Produktplanering |
| 10. Tidsschema | | | | |
| 10.1 Enligt projektplanering | | K | | Tidsplanering |
| 11. Säkerhet | | | | |
| 11.1 Ej orsaka skada på operatör | | K | | Säkerhetsinspektion |

4.4 Konceptgenerering med hjälp av Morfologisk matris

I den Morfologiska matrisen listas de delfunktioner som måste lösas för att skapa ett fungerande koncept. Till varje delfunktion har projektgruppen tagit fram flera tänkbara lösningar. Dessa lösningar baseras på befintliga vindsikt, befintliga komponenter som används i andra sammanhang och egna idéer som uppkommit genom brainstorming i projektgruppen. Genom att sedan vandra genom matrisen och kombinera flera olika dellösningar togs ett flertal koncept fram. Dessa redovisas i *tabell 2*.

Tabell 2 - Morfologisk matris

| Delfunktioner | Dellösningar | | | | | | |
|--|--|---|---|---|--|--|---|
| Inflöde och portionering av maskinsand | Matarskruv underifrån | Matarskruv från sidan | Gravitation/nedsläpp ovanifrån med roterande luckor. | Löpande band | Hiss | Gravitation, rörets dimension styr flödesmängden | Gravitation med vertikalt stegande hjul. Släpper ut små portioner |
| Fördelning av partiklar inne i vindsikten | Spridningsgaller stillastående | Spridningsgaller roterande | Släpps över vertikalt luftflöde | Slunga. Roterande slev som sprider ut portioner | Roterande kona utan spjäll | Stillastående kona | |
| Skapa luftflöde | Axialfläkt underifrån. Inga partiklar igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar sugas igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar avskiljs innan fläkt | Fläkt gjord av utbytbara plåtar. Lätt utbytbar. Partiklar färdas igenom. | Kombination av flera fläktar | Fläkt från sidan | Två fläktar från sidan |
| Centrifugalkraftsgenerering | Fläkt med designade rotorblad som genererar ett roterande luftflöde | Placering av galler som lutar i luftflödets riktning och tvingar luften i en roterande bana | Geometrisk utformning av "turbinväggar" | Slunga ut sandpartiklarna | Kombination av designade rotorblad och returnvanes | Placering av fläkt | |
| Klassering av fina och grova partiklar | Finare partiklar sugas uppåt, grova faller ned åt pga deras tyngdkraft | Den horisontella hastigheten på partiklarna får grövre partiklar att åka ut till kanten snabbare än de fina, de faller ned på sidorna och fines åker upp i mitten | | | | | |
| Separering av fina partiklar från det interna luftflödets bana | Turbulens orsakas vid snabba geometriändringar | Areaskillnad gör att partiklarna tappar hastighet och faller ner | Filter | En svängd bana som transporterar både fina partiklar och luft. Fina partiklar trycks ut pga centrifugalkraft. Luften följer annan bana. | Kombination av turbulens och areaskillnad | | |
| Utflöden av partikelansamlingar, dvs transporten | Gravitationskraften | Matarskruv ut, Reglerar så att ingen luft sugas in. | Lock eller spjäll, som förhindrar att luft sugas igenom. Öppnas då en viss mängd är nådd. | | | | |
| Möjliggöra mätningar av luftflöden | Instickmöjlighet av Prandtlrör | | | | | | |

4.5 Genererade koncept

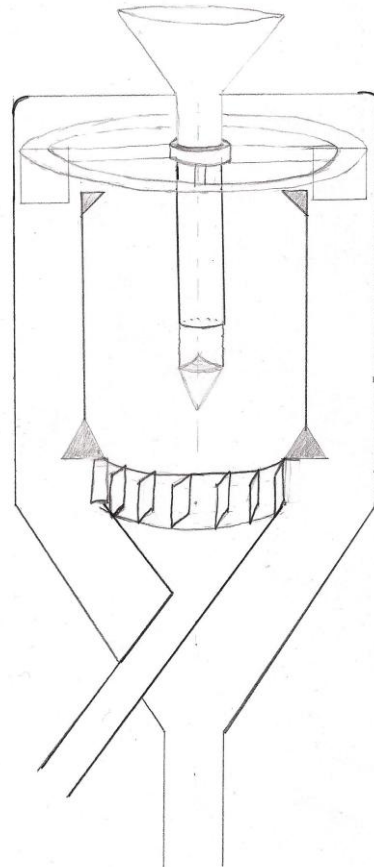
Kombinationen av dellösningarna i den morfologiska matrisen som bygger upp följande koncept går att finna i *Bilaga 1*.

4.5.1 Koncept 1

Sand förs in i centrum av maskinen genom två olika varianter som nämns längre ner som, *Koncept 1.1* och *Koncept 1.2*. När sanden förs in i centrum på vindsikten påverkas den av ett luftflöde. Luften cirkuleras med hjälp av radialfläkt som skapar ett flöde genom att den både suger luft från centrum av innerskalet och trycker ut luften på sidorna i ytterskalet. Denna fläkt finns ej att köpa, utan kommer att få tillverkas specifikt till detta ändamål. Vid tillverkning kommer fläktbladen designas så att de lätt går att byta ut vid slitage. Detta kommer sannolikt påverka strömningsegenskaperna negativt, men ger en mycket högre livslängd och servicemöjlighet. Luftflödet som fläkten skapar är både cirkulärt och vertikalt, det vill säga likt en spiral. För att åstadkomma ett ännu starkare cirkulärt flöde vägleds luften, från ytterskalet in i innerskalet, av så kallade return vanes (riktningsblad). Luftflödet pressas mellan dessa riktningssblad och tvingas i deras riktning. Genom att utforma dessa på lämpligt sätt kan man optimera flödesriktningen i vindsikten.

Geometrin hos vindsikten består av två trummor, en inre och en yttre illustrerat i *figur 9*, där all sand förs in mitten av den inre trumman. Hos de tyngre sandpartiklarna övervinner tyngdkraften den lyftkraft som luftflödet skapar. De faller därför nedåt i innertrumman och samlas i sin ansamlingsposition. Hos de finare partiklarna övervinner lyftkraften tyngdkraften och partiklarna följer luftflödet uppåt i innertrumman. De fina partiklarna sugas sedan genom fläkten och färdas ner mellan de två trummorna till sin ansamlingsposition. Eftersom luft och de finare partiklarna färdas i samma riktning krävs att de skiljs åt för att inte de små partiklarna skall föras in i systemet igen. Därför leds luftflödet förbi en snäv kant som gör att det bildas turbulens som gör att partiklarna inte hinner följa med luften och ramlar nedåt. Utöver turbulensen sker även en areaökning i det utrymme där partiklarna ska frigöra sig från luftflödet. Areaökningen leder till att lufthastigheten minskar vid insuget från yttre trumman till inre trumman. Turbulensen tillsammans med areaökningen leder till att de finare partiklarna kommer därför vilja falla nedåt och inte sugas med luftflödet.

För att behålla egenskaperna hos ett intern luftflöde måste systemet vara tätt vid såväl inmatning av material som utloppen för fina och grova partiklar. Vid utloppen för fina och grova partiklar kommer en anordning konstrueras så att då en förutbestämd mängd partiklar samlats i de olika facken öppnas en lucka och släpper ut ansamlingarna. Denna lucka stängs sedan snabbt och hindrar luft från att



Figur 9 - Koncept 1

sugas in i systemet. Inmatningen av partiklarna kan ske på två sätt. Det sätt som är mest lämpligt bestäms av hur luftflödet påverkas av inloppet.

4.5.1.1 Koncept 1.1

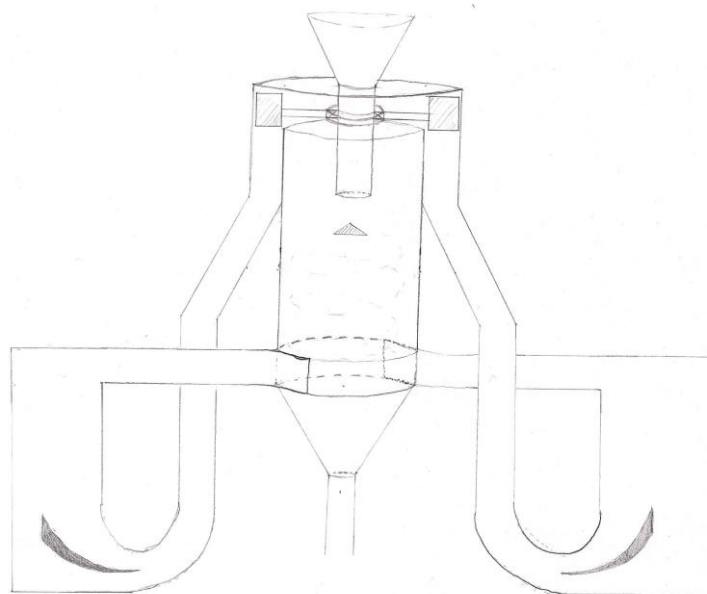
Maskinsand lagras ovanför vindsikten och förs ner genom ett rör med varierbart inloppsdiameter in i maskinen. Då sanden tar sig in i vindsikten faller den först ner till önskad höjdlägesposition genom ett rör för att sedan träffa och ledas en bit ut från centrum med hjälp av stillastående kona, som även bromsar sandens fart i vertikalriktning en aning. Detta koncept har valts som referenslösning i elimineringsprocessen senare i rapporten.

4.5.1.2 Koncept 1.2

Maskinsand lagras under vindsikten och förs kontrollerat upp i maskinen med hjälp av en reglerbar matarskruv. Längst upp på matarskruvens är en kona fastsatt som roterar med skruvens hastighet. Detta gör att maskinsanden fördelas jämnt innan den anträffas av luftströmmen.

4.5.2 Koncept 2:

Inmatning av maskinsand sker ovanifrån in i en cirkulär trumma, se *figur 10*. Sanden träffar en stillastående kona, sprids ut i trumman och fångas upp i ett spiralformat luftflöde. Grova partiklar faller, på grund av tyngdkraften, ner i trumman och leds ut genom ett rör i botten på vindsikten. Fina partiklar följer med det spiralformade luftflödet uppåt i trumman och passerar en fläkt, vilken trycker ner luft tillsammans med de fina partiklarna i två kanaler. Dessa kanaler leds ner till två separata behållare i vilka avskiljning av fina partiklar från luft sker. Avskiljningen sker genom att de fina partiklarna, som har en högre centrifugalkraft än luftpartiklarna, trycks utåt i en svängd bana. Genom att placera en avskiljningsvägg, mellan området där större delen fina partiklar färdas och området närmare rotationscentrum där luften färdas, förstärker avskiljningseffekten. De två separata behållarna är stora i förhållande till trumman, vilket gör att lufthastigheten minskar och de fina partiklarna hamnar på en lutande botten i behållarna och leds ut genom ett hål i ena änden. Luften leds upp i ett rör som återansluter till trumman. Return vanes ser till att rikta det återkopplade luftflödet, så att ett cirkulärt luftflöde uppstår.



Figur 10 - Koncept

För att luft inte skall sugas från utloppen sitter det luckor i utloppen som öppnas när tillräcklig mängd sand befinner sig över luckorna. Fläkten kommer att behöva tillverkas specifikt till detta ändamål och bestå av utbytbara fläktblad då slitage på fläktbladen kommer uppstå. Detta kan leda till sämre strömningsegenskaper men ökar livsländan avsevärt.

4.5.3 Koncept 3 och 4

Det här konceptet skiljer sig markant från de övriga koncepten då det inte har en symmetriskt placerad fläkt för att skapa det spiralformade luftflödet. Likt de andra koncepten finns dock en cirkulärt symmetrisk trumma som själva klasseringen sker i. Fläkttypen som används här är av typen axialfläkt, vilket innebär att flödet sker i axelns riktning. Fläkten är placerad under inmatningsröret för sand, tangentiellt mot trumman och riktad snett uppåt för att flödet ska få en vertikal och en cirkulär komponent. En specialklippt och valsad plåt gör att man kan skapa ett tätt inlopp för luftflödet med en optimerat vinkel för att erhålla rätt spiralform och således en korrekt lyftkraft. De tyngre partiklarna faller ner i trummans centrum, medan de finare partiklarna följer lyftflödet uppåt i trumman. Trumman övergår sedan till ett rör som leder luftflödet tillsammans med de fina partiklarna ner i en större trumma. I den stora trumman tappar luftflödet hastighet på grund av den stora arean, vilket leder till att lyftkraften minskar. På motsatt sida suger fläkten tillbaka luften som då inte tar med sig de fina partiklarna då hastigheten på flödet minskat tillräckligt mycket. Variationer i utseendet på det utrymme där de fina partiklarna avskiljs från luftströmmen, mängden fläktar och hur många inlopp som finns leder till två olika koncept med två varianter för varje koncept.

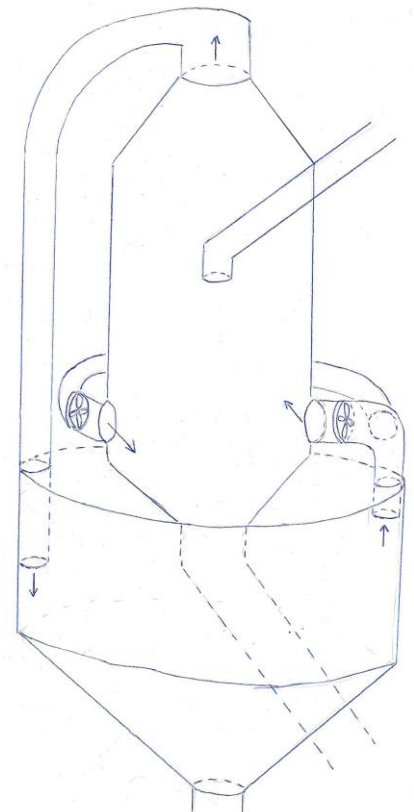
4.5.3.1 Koncept 3.1

Införsel av maskinsand sker uppifrån och regleras med hjälp av en skjutbar lucka med olika stora hål i. En fläkt ansluts tangentiellt och skapar ett spiralformat luftflödet. Fläkten kan behöva riktas uppåt med en viss vinkel för att ge ett tillräckligt högt vertikalt luftflöde och således ge en tillräckligt hög lyftkraft. Eftersom det endast är en fläkt på ena sidan finns risk för att det cirkulära luftflödet inte är tillräckligt homogent.

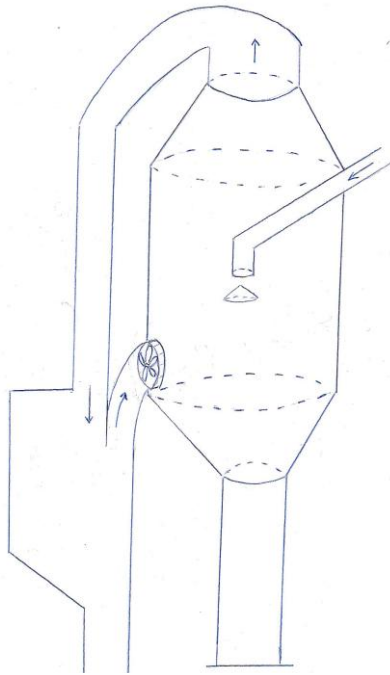
Det utrymme där de fina partiklarna avskiljs från luftflödet är cirkulärt och centrerat kring trumman. En fördel med detta är att samma stativ kan användas för att hålla upp såväl trumman som avskiljningslåda samtidigt som konstruktionen är kompakt och kräver mindre utrymme, se figur 11.

4.5.3.2 Koncept 3.2

Denna variant är identisk med *koncept 3.1* förutom att den har två stycken fläktar med inlopp tangentiellt till trumman, se *figur 11*. Detta medför en större kostnad och högre komplexitet, men leder till att luftflödet kan få en bättre fördelning inne i trumman.



Figur 11 - Koncept 3.1 och Koncept 3.2



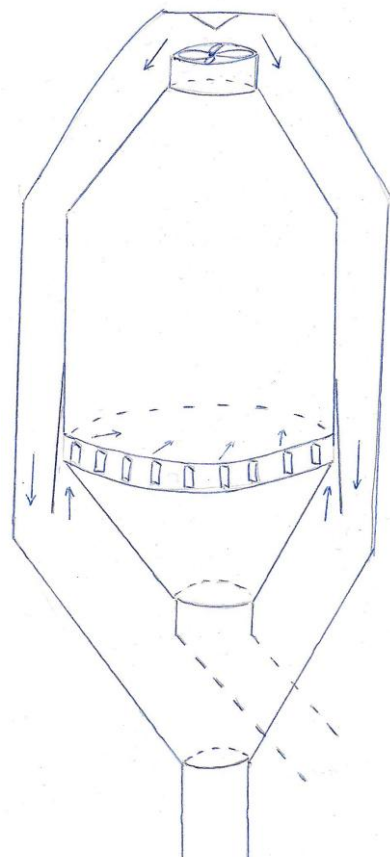
Figur 12 - Koncept 4.1

4.5.3.3 Koncept 4.1

Detta koncept, se *figur 12*, är mycket likt *koncept 3.1* och *koncept 3.2* förutom att avskiljningslådan ej är centrerad kring trumman utan står separat bredvid. Detta skulle kunna medföra en enklare konstruktion, samt att man kan koppla isär trumman från lådan och på så sätt underlätta transport. En nackdel är dock att konstruktionen tar upp större area och kräver två separata stativ. I detta koncept skapas luftflödet av en fläkt som sitter tangentiellt med trumman.

4.5.3.4 Koncept 4.2

Detta koncept är identiskt med *koncept 4.1* med skillnaden att det finns två fläktar och två inlopp in i trumman. På så sätt fås ett mer homogent cirkulerande flöde, men en förhöjd kostnad och komplexitet.



Figur 13 - Koncept 5

4.5.4 Koncept 5

Det här konceptet, se *figur 13*, bygger på att en axialfläkt, placerad på toppen av innertrumman, skapar ett luftflöde som trycker ut luften på sidorna mellan de båda trummorna. De fina partiklarna följer med luftflödet upp genom fläkten. När de fina partiklarna ska avskiljas från luftflödet sker detta genom att tvinga luften kring en skarp kant. Turbulensen som skapas tillsammans med en areaökning är tillräckligt för att de fina partiklarna faller ner i uppsamlingsplatsen. Rikttningsblad tvingar sedan luftflödet att ta en spiralformad bana in i innertrumman. Materialflödet sker snett ovanifrån in i centrum på innertrumman. Alternativt underifrån med hjälp av en matarskruv.

4.6 Urvalsprocess för minska antalet koncept (Pugh-matris)

I tidigare steg genererades ett stort antal koncept. Eftersom det är tidskrävande att utveckla många koncept samtidigt inleds nu en elimineringsprocess för att minska mängden koncept på ett systematiskt sätt. Detta sker till en början med en *Pughmatris*, se *tabell 3*.

Tabell 3 - Pughmatris

| Kriterium | Alternativa lösningar | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | Koncept 1 (Referens) | Koncept 2 | Koncept 3.1 | Koncept 3.2 | Koncept 4.1 | Koncept 4.2 | Koncept 5 |
| Justering av brytpunkt | X | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Robusthet | X | - | 0 | 0 | 0 | + | - |
| Kapacitet (Från CFD analys) | X | - | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| Enkel tillverkning | X | - | + | + | + | + | + |
| Användarvänlighet | X | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Slitagetålighet (Från CFD analys) | X | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Storlek | X | - | - | - | - | - | 0 |
| Tekniska risker | X | 0 | + | + | + | + | 0 |
| Säkerhet | X | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Risk för dammutsläpp | X | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Servicemöjlighet | X | 0 | + | + | + | + | - |
| Placering av mätutrustning | X | 0 | + | + | + | + | 0 |
| Estetiskt tilltalande | X | - | - | - | - | - | 0 |
| Luftflöde (Från CFD analys) | X | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Σ + | X | 0 | 4 | 4 | 4 | 5 | 1 |
| Σ 0 | X | 9 | 8 | 8 | 8 | 7 | 10 |
| Σ - | X | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Nettovärde | X | -5 | 2 | 2 | 2 | 3 | -1 |
| Rangordning | 3 | 5 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4 |
| Vidareutveckla | JA | NEJ | JA | JA | JA | JA | NEJ |

Koncept 1 valdes som referens eftersom den ansågs ha stor potential och var lik de vindsiktat med internt luftflöde som redan finns på marknaden. Samtliga koncept jämfördes sedan med referensen med avseende på 14 olika kriterium. Är konceptet bättre än referensen på ett kriterium sätts ett plustecken, är de lika bra sätts en nolla och är referensen bättre än koncepten sätts ett minustecken. Genom att summerna ihop plustecknen och minustecknen kan ett nettovärde, differensen mellan plus- och minustecken, beräknas till varje koncept. Är detta nettovärde positivt anses konceptet vara bättre än referensen och bör sannolikt vidareutvecklas. Visar nettovärdet på ett negativt tal anses konceptet vara sämre än referensen och ska då förkastas. Observera att kriterierna inte är viktade. Alltså kan kriterium som inte är så viktigt för projektets syfte bidra till att koncept med stor potential förkastas. Uppkomsten av ett negativt nettovärde bör alltså analyseras innan ett koncept förkastas. Vid osäkerhet på resultatet kan en ny referens väljas och processen itereras.

Observera att de tre kriterierna, kapacitet, slitagetålighet och luftflöde, inte kunde analyseras på ett tillförlitligt sätt utan att först testa konceptens strömningsegenskaper. Därför modellerades vissa av koncepten i CAD och CFD-analys genomfördes. CFD-analysen på dessa koncept redovisas i avsnittet nedan. Eftersom både CAD-modellering och CFD-analys är tidskrävande processer valde projektgruppen, i detta skede, att endast undersöka *koncept 1* och *koncept 3.1* med denna metod. Dessa valdes på grund av att *koncept 2* och *koncept 5* har många likheter med *koncept 1*. På så sätt kan man genom att analysera resultatet för *koncept 1* erhålla värdefull information om *koncept 2* och *koncept 5*. Detsamma gäller för *koncept 3.2*, *koncept 4.1* och *koncept 4.2* som har många likheter med *koncept 3.1*. En grön markering i Pughmatrisen betyder att resultatet kommer från en CFD-analys medan en röd markering innebär resultatet är en uppskattning utan att ha testats.

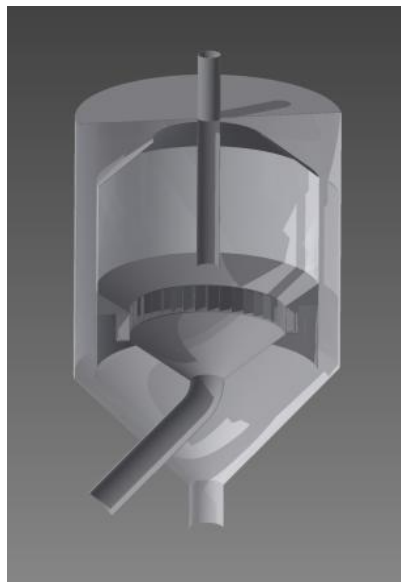
Efter genomförd analys ses att *koncept 2* och *koncept 5* inte kan mäta sig med referensen, *koncept 1*. Främst beror det på att dessa koncept anses ha sämre kapacitet och vara mindre robusta. *Koncept 2* har en avskiljare som skiljer fina partiklar från luftflödet med hjälp av centrifugalkraften, då sandpartiklarna har mycket större massa än luftpartiklarna och slungas ut mot kanten. Denna process kommer sannolikt försämrats vid ett högt flöde av material. Partiklarna kommer då studsas mot varandra och vissa partiklar kommer inte avskiljas från luftflödet. De fina partiklarna har en så liten massa att turbulens i luftflödet, som uppkommer vid högt luftflöde, kan göra att effekten av centrifugalkraften minskas. Avskiljningsprocessen kommer således bli en flaskhals och ge en sämre kapacitet. Fläkten i detta koncept sitter på toppen av innertrumman, suger upp luft i mitten av innertrumman och trycker ut luften på sidan ned i två rör. Övergången från ett cirkulärt flöde på en stor area ner i två mindre rör kommer sannolikt ge ett turbulent flöde och påverka prestandan.

I *koncept 5* skapas ett luftflöde genom en axialfläkt på toppen av innertrumman. Luften tillsammans med de fina partiklarna sugas igenom denna fläkt och trycks upp mot toppen av vindsikten för att sedan pressas ned på sidan. Detta innebär att luftflödet kommer få förluster på grund av kollisionen med toppen samtidigt som turbulens skapas. Förslitningsskador kommer sannolikt att ske mot toppen när de fina partiklarna blåstrar ytan. Fläkten som var tänkt att köpas är inte anpassad för att partiklar ska passera genom den och kommer därför sannolikt att utsättas för stort slitage. Då servicemöjligheterna är dåliga för såväl fläkt som toppen, förkastas detta koncept också.

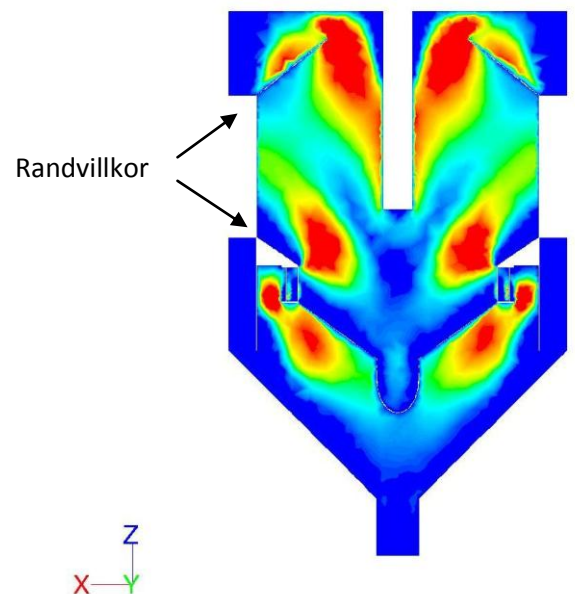
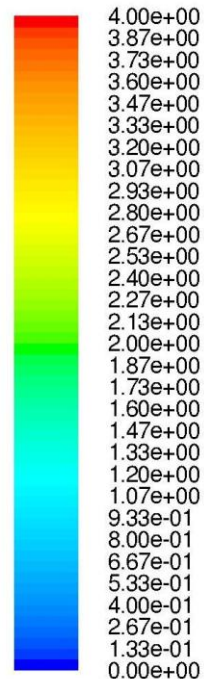
4.7 CFD-simulering av koncept 1 och koncept 3.1 för analys i Pughmatris

För att erhålla en korrekt analys i Pughmatrisen, se *tabell 2* ovan, krävdes att strömningsegenskaperna analyserades. Utformningen för *Koncept 1* och *Koncept 3.1* ansågs vara representativa för övriga koncept. Därför gjordes endast CAD-modulering och CFD-analys på dessa.

Nedan visas *Koncept 1*, se *figur 14*, tillsammans med utförd CFD-simulering, se *figur 15*.



Figur 14 – 3D-modell, koncept 1



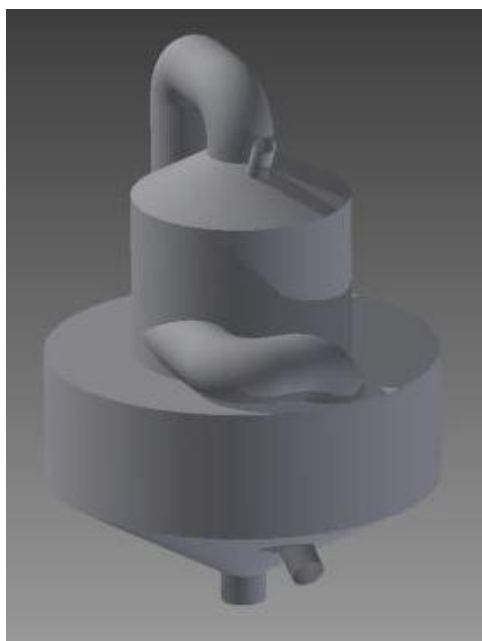
Contours of Z Velocity (m/s)

Figur 15 – CFD-simulering, koncept 1

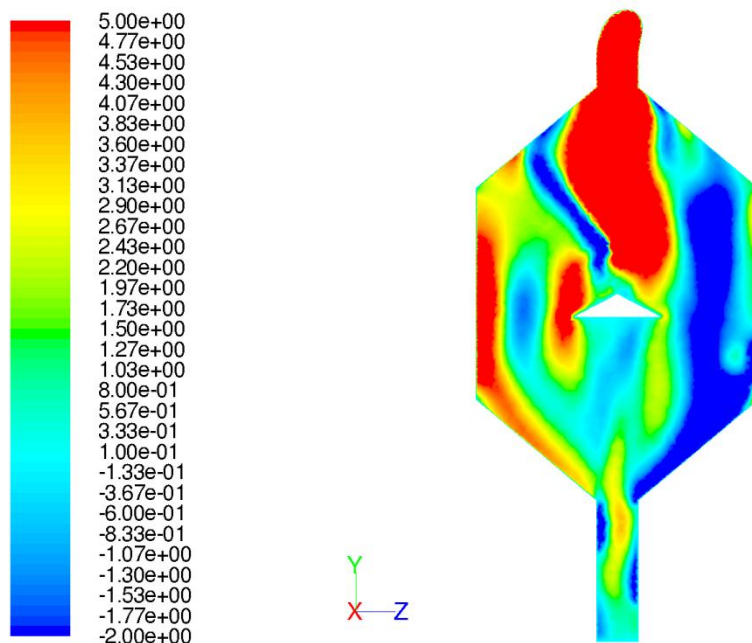
I CFD-simuleringen analyserades endast det vertikala luftflödet i positiv z-riktning för att undersöka om tillräcklig lyftkraft kunde uppnås på ett tillfredställande sätt. För att skapa ett luftflöde sattes ett randvillkor vid undersidan på innertrumman som trycker ut luft genom return vanes. Samma flöde som skapas måste transporteras ut ur innertrumman. Därför sätts ett randvillkor för vid toppen av innertrumman som leder ut luften. Randvillkoren är markerade i *figur 15*. Observera att negativa hastigheter, det vill säga riktade nedåt, är borttagna för att underlätta visualiseringen i innertrumman och visas endast som stillastående luft med blå markering.

I CFD-analysen fås ett högt jämnt flöde med tillräckligt höga hastigheter att de fina partiklarna förs med i luftströmmen. Speciellt vid inloppet av material finns en hög lufthastighet som innebär att partiklarna kommer att fångas upp direkt då de hamnar i vindsikten. Ser även att en hög hastighet erhålls vid toppen av innertrumman. Den höga hastigheten säkerställer att partiklar som nått toppen av innertrumman kommer få en ännu högre lyftkraft och transporteras ut ur innertrumman.

Nedan visas *Koncept 3.1*, se *figur 17*, tillsammans med utförd CFD-analys, se *figur 16*.



Figur 17 – 3D-modell, koncept 3.1



Contours of Y Velocity (m/s)

Figur 16 - CFD-simulering av koncept 3.1

Även i denna CFD-simulering analyserades det vertikala luftflödet för att kontrollera lyftkraften som påverkar partiklarna. Ur modellen kan man utläsa att det vertikala luftflödet är relativt inhomogent, men tillräcklig lyftkraft uppnås på vänstra sidan. På högra sidan fås däremot ett negativt flöde. Det är där som luftinloppet ligger. När luften strömmar in i trumman drar det med sig luften runt om och bildar en lågtryckszon. Detta innebär att luft uppifrån sugas nedåt. Luften går dock aldrig hela vägen ner till botten av konan så fina partiklar borde ej hamna i botten tillsammans med de grova partiklarna. Genom att ändra förhållandet mellan luftintaget och diametern på trumman kan ett homogent flöde sannolikt ändras. Annars skulle två luftinlopp och två separata fläktar lösa detta problem.

Högst vertikal hastighet uppnås vid utsuget ur trumman. Partiklar som når upp till den nivån kommer få en högre lyftkraft och transporteras ut ur trumman. Observera att ett negativt flöde syns uppe i vänster hörn. Detta beror på att inloppet av material sker där. Inloppsörret för materialet påverkar således luftflödet negativt. Genom att flytta inloppet till centrum av trumman kan detta sannolikt minimera inverkan på luftflödet.

Sannolikt är ett inlopp med en fläkt, tillräckligt för att prestera ett homogent cirkulerande flöde såväl som det undersökta vertikala flödet, men detta kontrolleras i utförligare CFD-simuleringar som redovisas i senare avsnitt.

4.8 Urvalsprocess för att välja ett slutgiltigt koncept (viktningsmatris och Kesselringmatris)

I detta avsnitt jämförs koncepten mot varandra på en djupare nivå. Koncepten elimineras efterhand till dess att endast det bästa konceptet återstår.

4.8.1 Viktningsmatris för att prioritera kriterier

För att välja det koncept som på bästa sätt uppfyller projektets syften, krävs att kriterierna prioriteras på ett korrekt sätt. Ett koncept som uppfyller väsentliga kriterier på ett bra sätt ska väljas framför ett koncept som uppfyller många mindre viktiga kriterier. För att göra detta val krävs att kriterierna jämförs mot varandra. Detta görs i viktningsmatrisen ovan, se *tabell 4*. För varje position jämförs kriteriet på varje rad med motsvarande kriterier i kolumnerna. Om ett kriterium i kolumnen (till vänster) anses vara viktigare än det kriterium de jämförs med (vid toppen) sätts en etta i rutan, är de lika viktiga sätts 0,5 och är det mindre viktigt sätts en nolla. Sedan summeras värdena ihop och utgör kriteriets poäng. Den viktning som används i Kesselringmatrisen nedan är kriteriets poäng dividerat med totala antalet poäng för att få en relativ poängfördelning.

Tabell 4 - Viktningsmatris

| Kriterier: | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | Σ | Σ_{rel} |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|----------|----------------|
| (A) Justering av brytpunkt | 1 | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 | 0 | 0 | 8,50 | 0,129 |
| (B) Robusthet | 0 | 1 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3,00 | 0,045 |
| (C) Kapacitet | 0,5 | 1 | 1 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 | 0 | 7,50 | 0,114 |
| (D) Enkel tillverkning | 0 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 | 1 | 0,5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 6,00 | 0,091 |
| (E) Användarvänlighet | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 1,00 | 0,015 |
| (F) Slitagetålighet | 0 | 1 | 0,5 | 0,5 | 1 | 1 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 | 1 | 0 | 5,00 | 0,076 |
| (G) Storlek | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2,50 | 0,038 |
| (H) Tekniska risker | 0,5 | 1 | 0,5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 7,00 | 0,106 |
| (I) Servicemöjlighet | 0 | 1 | 0 | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 | 0 | 1 | 0,5 | 1 | 0 | 5,50 | 0,083 |
| (J) Placering av mätutrustning | 0,5 | 1 | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,5 | 1 | 0 | 0 | 8,50 | 0,129 |
| (K) Estetiskt tilltalande | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,50 | 0,008 |
| (L) Luftflöde | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 11,00 | 0,167 |

4.8.2 Kesselringmatris för att rangordna koncept

I Kesselringmatrisen nedan, se *tabell 5 och 6*, betygsätts varje koncept, i en skala mellan 1 till 5, efter hur väl som kriteriet uppfylls. Betygsättningen multipliceras sedan med viktningen som erhöles i viktningsmatrisen, se *tabell 4*. Produkten för varje kriterium summeras ihop och utgör konceptets totala poäng. Konceptet med högst poäng anses vara det bästa konceptet för att uppfylla projektets syften. På grund av platsbrist redovisas Kesselringmatrisen i två delar.

Tabell 5 – Kesselringmatris, Del 1

| Kriterier: | Vikt | Ideal | | Koncept 1 | | Koncept 3.1 | | Koncept 3.2 | |
|--------------------------------|--------------|-------|---------|-----------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| | | Betyg | %*Betyg | Betyg | %*Betyg | Betyg | %*Betyg | Betyg | %*Betyg |
| (A) Justering av brytpunkt | 0,129 | 5 | 0,64 | 4 | 0,52 | 4 | 0,52 | 4 | 0,52 |
| (B) Robusthet | 0,045 | 5 | 0,23 | 4 | 0,18 | 4 | 0,18 | 3 | 0,14 |
| (C) Kapacitet | 0,114 | 5 | 0,57 | 3 | 0,34 | 3 | 0,34 | 3 | 0,34 |
| (D) Enkel tillverkning | 0,091 | 5 | 0,45 | 2 | 0,18 | 5 | 0,45 | 4 | 0,36 |
| (E) Användarvänlighet | 0,015 | 5 | 0,08 | 5 | 0,08 | 5 | 0,08 | 5 | 0,08 |
| (F) Slitagetålighet | 0,076 | 5 | 0,38 | 4 | 0,30 | 2 | 0,15 | 2 | 0,15 |
| (G) Storlek | 0,038 | 5 | 0,19 | 4 | 0,15 | 3 | 0,11 | 3 | 0,11 |
| (H) Tekniska risker | 0,106 | 5 | 0,53 | 3 | 0,32 | 5 | 0,53 | 5 | 0,53 |
| (I) Servicemöjlighet | 0,083 | 5 | 0,42 | 3 | 0,25 | 3 | 0,25 | 3 | 0,25 |
| (J) Placering av mätutrustning | 0,129 | 5 | 0,64 | 3 | 0,39 | 4 | 0,52 | 4 | 0,52 |
| (K) Estetiskt tilltalande | 0,008 | 5 | 0,04 | 5 | 0,04 | 4 | 0,03 | 4 | 0,03 |
| (L) Luftflöde | 0,167 | 5 | 0,83 | 3 | 0,50 | 3 | 0,50 | 3 | 0,50 |
| Totalt | | 5,00 | | 3,24 | | 3,66 | | 3,52 | |
| Totalt/Totalt _{ideal} | | 1 | | 0,65 | | 0,73 | | 0,70 | |
| Rangordning | | - | | 5 | | 1 | | 3 | |

Tabell 6 – Kesselringmatris, Del 2

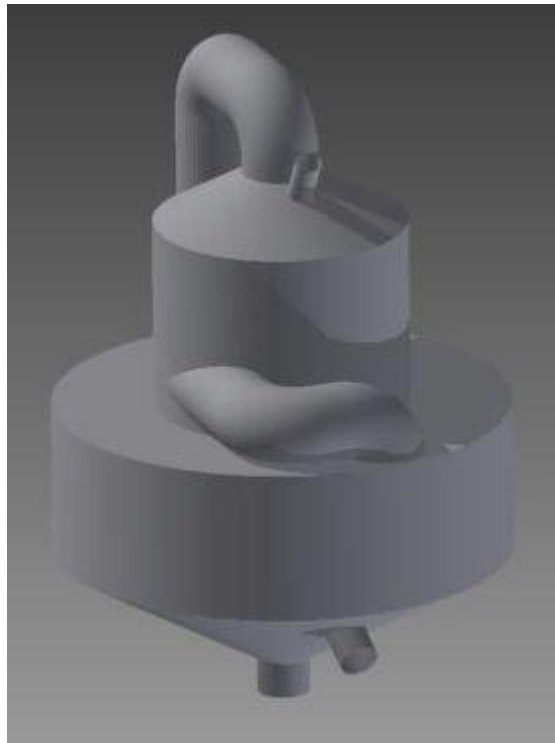
| Kriterier: | Vikt | Ideal | | Koncept 4.1 | | Koncept 4.2 | |
|--------------------------------|--------------|-------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| | | Betyg | %*Betyg | Betyg | %*Betyg | Betyg | %*Betyg |
| (A) Justering av brytpunkt | 0,129 | 5 | 0,64 | 4 | 0,52 | 4 | 0,52 |
| (B) Robusthet | 0,045 | 5 | 0,23 | 4 | 0,18 | 3 | 0,14 |
| (C) Kapacitet | 0,114 | 5 | 0,57 | 3 | 0,34 | 3 | 0,34 |
| (D) Enkel tillverkning | 0,091 | 5 | 0,45 | 5 | 0,45 | 4 | 0,36 |
| (E) Användarvänlighet | 0,015 | 5 | 0,08 | 5 | 0,08 | 5 | 0,08 |
| (F) Slitagetålighet | 0,076 | 5 | 0,38 | 2 | 0,15 | 2 | 0,15 |
| (G) Storlek | 0,038 | 5 | 0,19 | 2 | 0,08 | 1 | 0,04 |
| (H) Tekniska risker | 0,106 | 5 | 0,53 | 5 | 0,53 | 5 | 0,53 |
| (I) Servicemöjlighet | 0,083 | 5 | 0,42 | 3 | 0,25 | 3 | 0,25 |
| (J) Placering av mätutrustning | 0,129 | 5 | 0,64 | 4 | 0,52 | 4 | 0,52 |
| (K) Estetiskt tilltalande | 0,008 | 5 | 0,04 | 3 | 0,02 | 3 | 0,02 |
| (L) Luftflöde | 0,167 | 5 | 0,83 | 3 | 0,50 | 3 | 0,50 |
| Totalt | | 5,00 | | 3,61 | | 3,44 | |
| Totalt/Totalt _{ideal} | | 1 | | 0,72 | | 0,69 | |
| Rangordning | | - | | 2 | | 4 | |

Koncept 3.1 anses enligt resultatet i Kesselringmatrisen vara det bästa konceptet, främst på grund av att detta koncept har en mindre komplexitetsgrad än de andra koncepten. Ett exempel på detta är att *koncept 1* kräver en specialtillverkad fläkt, medan man nu kan köpa en standardiserad fläkt med rätt luftflöde. Det blir således enklare att tillverka och underhålla denna vindsikt. Ytterligare en fördel är att detta koncept endast består av ett skal, istället för en yttertrumma och en innertrumma, vilket gör att mätningar av lufthastigheten i innertrumman underlättas.

Tidigare CFD-simuleringar tyder på att ett tillräckligt luftflöde kommer att uppnås och att luftflödet kommer vara homogent i vertikal riktning om inloppskanalens area ökas i förhållande i trumman. Skulle inte detta vara tillräckligt sätts en extra fläkt in för att jämna ut flödet. Ytterligare CFD-simuleringar krävs dock för att verifiera att det cirkulerande flödet är homogent och för vidareutveckling av känsliga geometrier. Sådana simuleringar redovisas i avsnittet nedan, kapitel 4.9.

4.9 Utveckling av valt koncept

Det valda konceptet (*figur 18*) använder sig av en trumma där själva klasseringen utförs. Luft förs in tangentiellt i trumman genom en kanal där en fläkt som genererar själva flödet i vindsikten sitter. Flödet tvingas att cirkulera uppåt i trumman likt en spiral eftersom det är den enda utvägen. Material förs in i flödet genom ett materialinloppsrör med en kona längst ned för att sprida ut partiklarna i flödet. De stora partiklarna slungas ut och träffar trummans vägg för att sedan falla ner på grund av gravitationskraften. De lättare partiklarna förs däremot uppåt med hjälp av flödets vertikala komponent. De förs in i ett rör som i sin tur leder dem till en stor trumma. I den stora trumman separeras de från luften eftersom arean ökar så pass mycket att hastigheten på luften kommer att vara nära 0 då flödet är konstant.

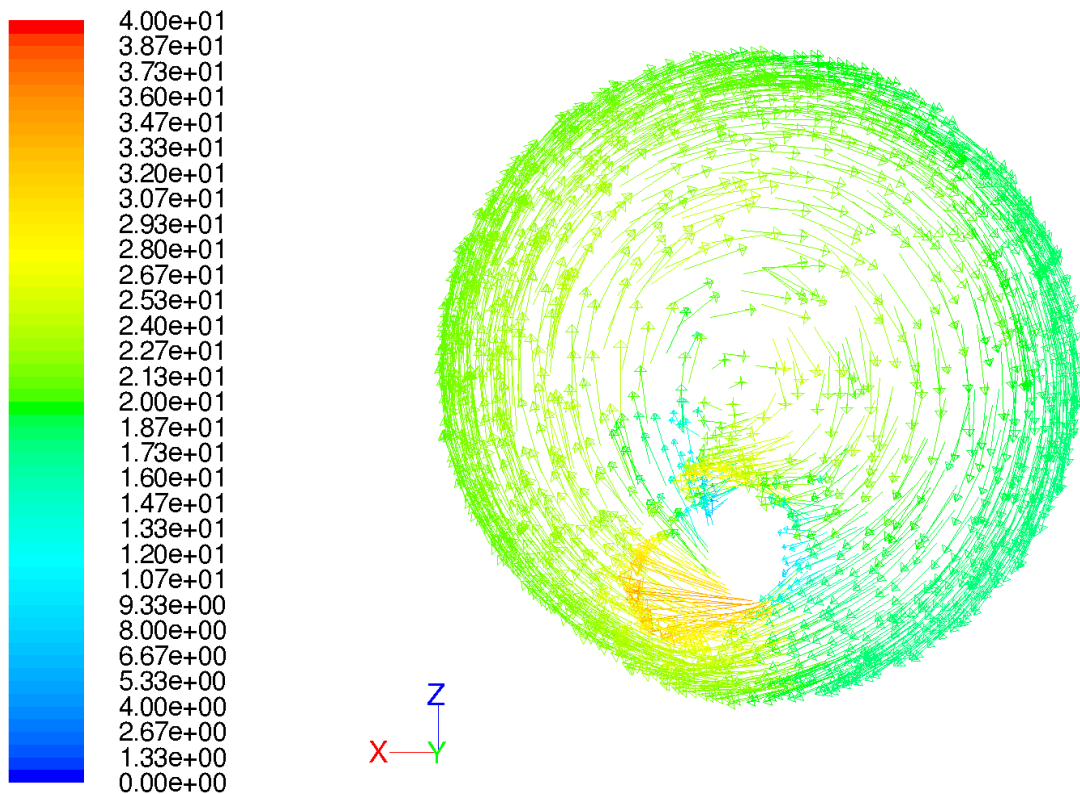


Figur 18 - Valt koncept

Eftersom konceptet inte var komplett i alla avseenden fick det utvecklas och förfinas för att möta de krav som ställdes på tillverkningsbarhet, volym och optimerad prestanda. För att verifiera konceptets funktion innan en kostsam och tidskrävande produkt tillverkas gjordes en förenklad prototyp i mindre skala och i billigare material. Volymen som valdes var en EUR-palls area med en höjd på 2 m för att komma igenom dörrposter.

För att få plats på EUR-pallen fick konceptets geometri ändras avsevärt. Den stora runda lådan där avskiljningen mellan fines och luft sker gjordes fyrkantig med samma mått som EUR-pallen. Då erforderlig plåt inte fanns tillgänglig till den först tänkta diametern på trumman och av platsbrist på pallen fick trummans diameter minskas. Fläktfästet fick ändras till ett som gjorde det möjligt att fästa fläkten på ett enkelt sätt. Även om geometrin ändrats markant på grund av begränsningarna bygger ändå den förenklade modellen på samma principer som den tänkta.

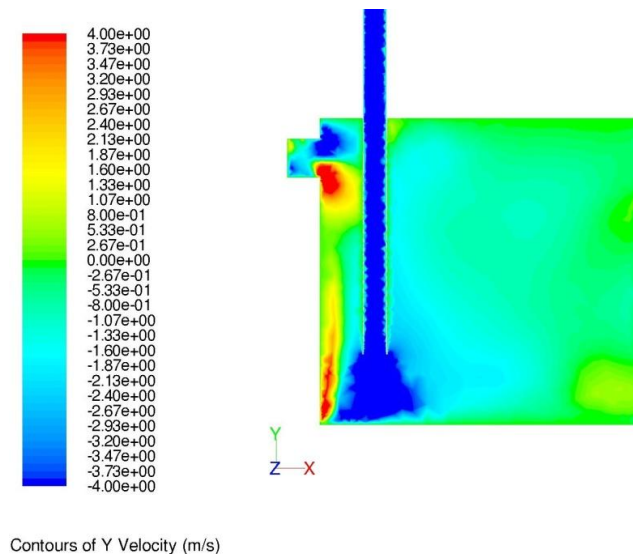
Med dessa ändringar gjordes en enkel 3D-modell för att kunna göra en CFD-analys på. Utifrån CFD-analysen framgår det att det finns tendenser till att inloppsflödet av luft kan ge sig av ner i trumman. Det syns också att materialinloppsröret påverkar det roterande flödet (som syns i *figur 19*) på ett sätt som kan göra att de små partiklarna stoppas upp och faller ner längs med trummans vägg (no-slip villkor). Eftersom det också skulle bli lättare att konstruera materialinloppsflödet om det kom in rakt ovanifrån istället för snett in i trumman ändrades det till att vara vertikalt.



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

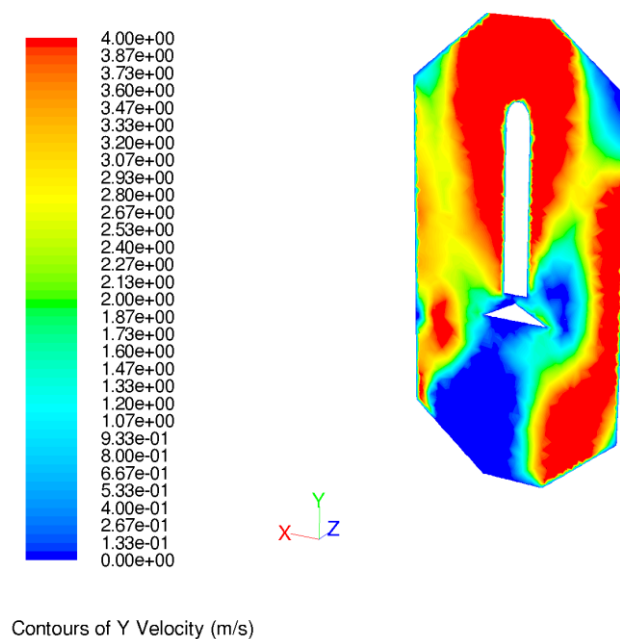
Figur 19 - Roterande flöde kring inloppsrör

Figur 20 verifierar att metoden med stor area ökning för att avskilja fina partiklar från luft fungerar då den vertikala hastigheten blir nära noll mellan utloppet och fläkten. För att ändå minska denna hastighet så mycket som möjligt flyttades utloppsröret för fina partiklar så långt bort som möjligt från fläkten.



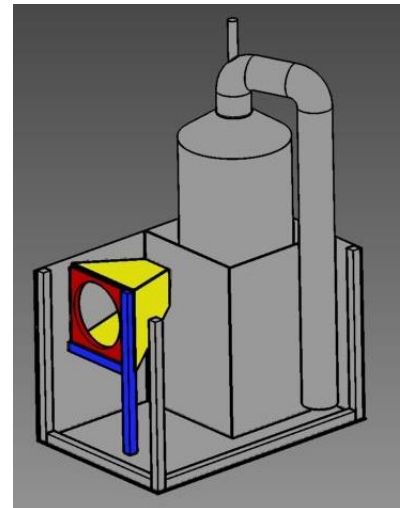
Figur 20 - Utloppsrör och inlopp av luft

I figur 21 där inloppet av luft sker på vänstra sidan verifieras att det vertikala flödet blir stort i centrum av trumman ända upp till den övre konan vilket är bra då det ska fånga upp och ta med sig de fina partiklarna ut genom den övre konan. Det syns också att vi får en vertikal hastighet långt ner i den nedre konan vilket inte är önskvärt. För att minska denna tendens modifierades inloppsröret från att ha varit horisontellt placerat till att få en vinkel på 15 grader uppåt mot horisontallinjen. Som syns i bilden finns det även risk för att flödet ges en vertikal bana istället för en cirkulär bana på motsatt sida av fläkten, som sitter till vänster i bilden.

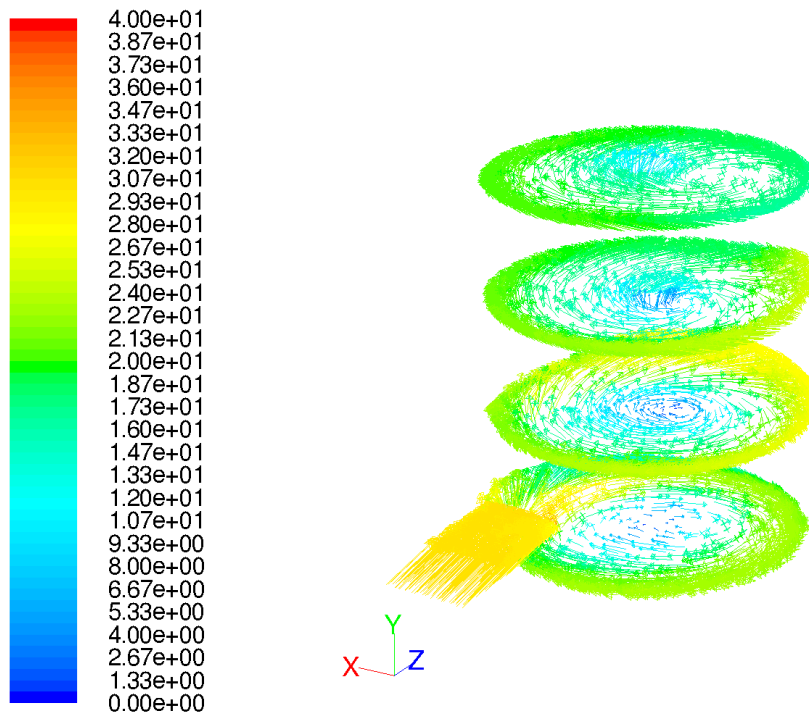


Figur 21 - Vertikal hastighet

En ny CFD-analys genomfördes på den modifierade 3D-modellen, se *figur 22*, för att verifiera de nya geometrierna. *Figur 23* visar flödet i trumman efter att ovanstående ändrats. Det framgår också att det räcker med en inloppskanal till trumman för att generera ett tillfredställande homogent stigande roterande flöde. Det bör dock anmärkas att hastigheten på andra sidan av inloppsröret är hög. Det går också att se, inte helt oväntat, att den roterande hastigheten är mindre i centrum av trumman än vad den är längre ut.



Figur 22 - 3D-modell av slutgiltigt koncept

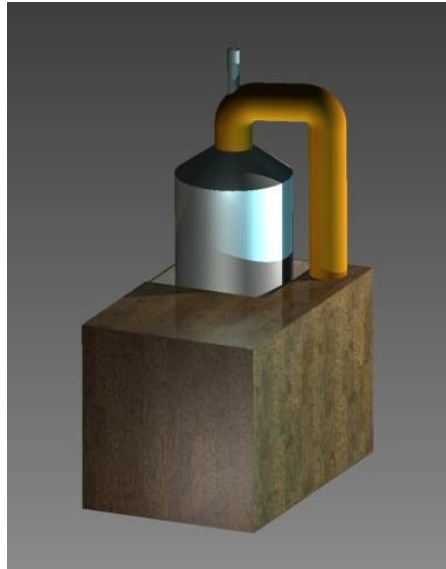


Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Figur 23 - Det slutgiltiga flödet i trumman

4.10 Tillverkning och detaljkonstruktion

Detta avsnitt avser tillverkningen och detaljkonstruktionen av prototypen, vindsiktens 3D-modell renderades och visas i *figur 24*. Först beskrivs prototypens alla delar i dessa avseenden för att sedan beskriva hur delarna påverkar prototypens funktion. Bilder används för att illustrera hur de olika komponenterna ser ut samt hur de tillverkades. Tillverkning utfördes till största del efter ritningsunderlag, utförligare ritningar finns tillgängliga i *Appendix 2*.



Figur 24 - Renderad 3D modell på tänkt design

4.10.1 Trumma

Trumman fick sin form genom att en 1 mm tjock stålplåt klipptes som en rektangel efter önskade dimensioner för att sedan rundvalsas, detta för att åstadkomma en cylindrisk geometri. Trumväggen överlappades 30 mm i skarvarna av den utskurna plåten för att ge utrymme att bilda ett förband. Överlappen fixerades i ett förband med hjälp av popnitar, det ger ett starkt förband samt är en enkel metod med tanke på åtkomligheten, popnitningen av trumman visas i *figur 25*. Överlappen tätades med silvertejp på utsidan.

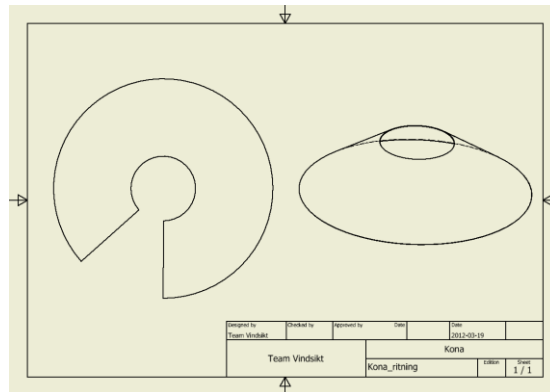
Tre hål placerades vertikalt över varandra med 200 mm mellanrum för att kunna föra in ett Prandtlrör. Hålet för luftinloppet i trummans sida ritades av direkt på trumman efter inloppsrörets verkliga profil. Detta hål kapades sedan ut med hjälp av vinkelkapmaskin.



Figur 25 - Popnitning och överlapp på trumman

4.10.2 Konor till trumman

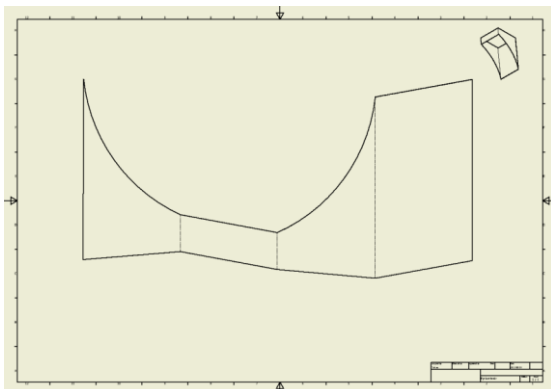
Konorna tillverkades med hjälp av en utbredningsritning som klipptes ut i skala 1:1 och ritades på en 1 mm stålplåt för att sedan enkelt kunna skäras ut i en bandsåg, geometrin som klipptes ut syns i *figur 26*. Utskuren geometri formades till en kona genom att böja plåten stegvis med handkraft, inifrån centrum till ytterkant med jämn delning kring hela varvet. En överlappning av plåtens skarvar gjordes och sammanfogades med en punktsvets, detta ger ett starkt förband samt är en enkel och snabb sammanfogningsmetod. Att punktsvetsa fungerade utmärkt då åtkomligheten var så pass god att punktsvetsen nådde trots sitt korta gap till alla önskade positioner.



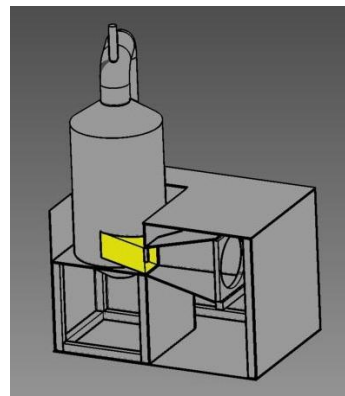
Figur 26 - Utbredningsritning av kona

4.10.3 Inloppskanal för luft till trumman

Inlopp av luft till trumman sker genom ett inloppsrör som tangerar trumman och är vinklat 15 grader uppåt, se *figur 28*, för att optimera den stigande roterande luftströmmen. För att underlätta tillverkningen konstruerades det fyrkantigt och inte runt eftersom en rund geometri hade varit svårare att tillverka och fästa in i trumman. Detta är en relativt komplicerad del att tillverka från en rörprofil och därför 3D-modellerades den upp som en "Sheet Metal Part" för att sedan kunna göra en "Flat-pattern". Utifrån det gjordes en utbredningsritning som skrevs ut på Chalmers A1 skrivare i skala 1:1, vilken i sin tur klipptes ut till en mall, hur utbredningsritningen såg ut visas i *figur 27*. Mallen tejpades fast på plåten och geometrin sågades ut med hjälp av en bandsåg. Därefter bockades plåten i 90 grader på tre ställen så att en fyrkantsprofil erhöles. För att kunna bocka och såga ut geometrin användes en stålplåt med en tjocklek på 1mm. Den bockade fyrkantsprofilens två sidokanter lades ihop och TIG-svetsades samman, se *figur 27*.



Figur 27 - Utbredningsritning av inloppsprofil



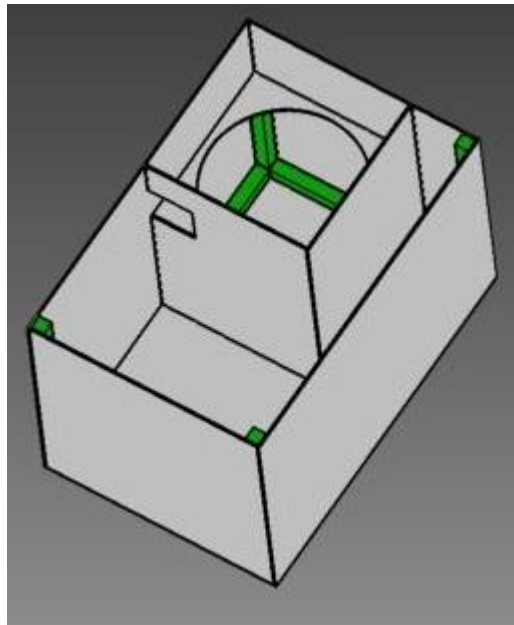
Figur 28 - Inloppsprofilens position

4.10.4 Sammansättning av trumman, konor och inloppskanal

För att sammansätta trumman med konorna punktsvetsades de ihop med hjälp av en MIG-svets. De punktsvetsades eftersom plåtarna är så pass tunna att genombränning lätt hade kunnat ske om en längre svetssträng hade lagts. För att tät springorna mellan punktsvetsarna lades en sträng med byggsilikon. Luftinloppskanalen punktsvetsades även den samman med trumman vid utskuret hål med hjälp av en MIG-svets då den är enkel att använda.

4.10.5 Låda för avskiljning av fina partiklar från luftflöde

Lådans yttersidor, innersidor och botten sågades ut i plywood och skruvades samman med hjälp av 45x45 mm reglar, likt *figur 29*. En av kortsidorna sitter fast med hjälp av gångjärn för att enkelt kunna öppna och rensa systemet på både grova och fina ansamlingar. Den är tillverkad med sådan passform den kläms fast mellan anliggande väggar vid förslutning. Locket till lådan består av en masonitskiva utsågad i önskad geometri. Lådan tätades tillsist i alla kantspringor med hjälp av byggsilikon för att undvika läckage.



Figur 29 - Låda med reglar i grönt

4.10.6 Reglerbar fläkt

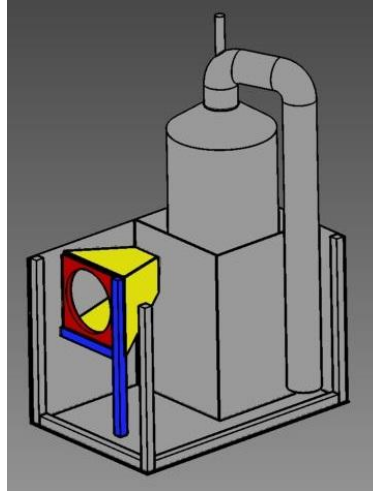
Fläkt, varvtalsregulator i form av tyristor och en kondensator levererades separat och monterades samman. Tyristorn reglerar varvtalet på fläkten via ett reglage. Kondensatorns uppgift är att jämna ut pulser till fläkten.

| | |
|--|--|
| <p>Axialfläkt med rund väggplatta:</p> <p>Luftflöde: 3410 m³/h Effekt 230 W Spänning: 1~230 VAC Storlek: 300mm Återförsäljare: ebm papst Art. Nr: W2E300CP0231</p> |  |
| <p>Tyristor:</p> <p>Spänning: 1~230 VAC Maxström: 2,0 A (0,2-2,0A) Säkring: 2,5 A Återförsäljare: ebm papst Art. Nr: 4615122</p> |  |
| <p>Kondensator 8μF:</p> <p>Kapacitans: 8 μF Spänning: 2~450 VAC Återförsäljare: ebm papst Art. Nr: 4610118</p> |  |

Figur 30 - Fläkt och komponenter för styrning

4.10.7 Fläkttrumma

Fläkttrumman ökar luft hastigheten på den luftström som leds in i trumman via inloppskanalen. Fläkttrummans sidor, gula i *figur 31*, sågas ut med angivna vinklar och dimensioner. Dessa snickras samman med dyckert och trälim för att sedan fästas på en upphängningsanordning, blåa i *figur 31*. Upphängningsanordningen består av ett regelverk uppbyggt av 45*45 mm regler hopsatta med hjälp av skruv. Även en platta, röd i *figur 31*, som fläkten fästs mot sågades ut och fästs i sin tur mot fläkttrumman.



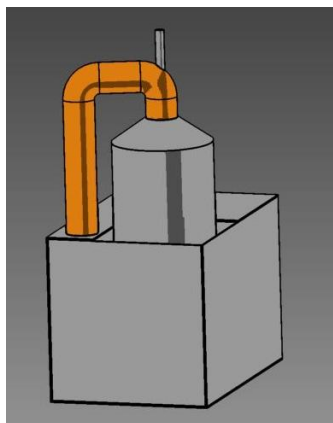
Figur 31 - Fläkttrummans position

4.10.8 Rörledning för utlopp av fina partiklar och luftflöde

Utflödet ut ur trumman transporterar fina partiklar in i lådan genom en monterad rörledning, se orange komponent i *figur 32*. Rörledningen är en modifierad sammansättning av avloppsrör. Rörets ytterdiameter är 160 mm och innerdiameter är 152 mm.

Sammansättningen består av en rak rördel och två rörböjor för att åstadkomma en U-sväng från trumman ner i lådan. Genom ena rörböjen borrar ett hål för att kunna föra igenom inmatningsrör av sand in i trumman. Springan mellan rörböjen och inmatningsröret tätas med byggsilikon.

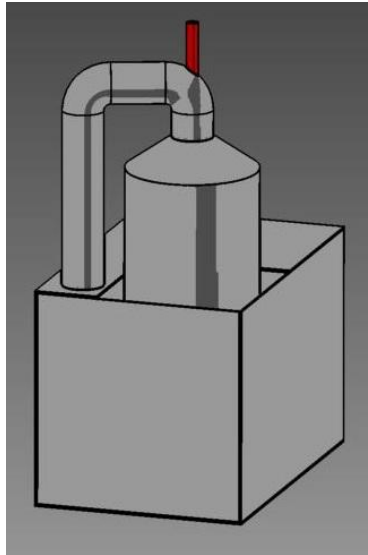
Den ena rörböjen är fäst i överkant av trumsystemet med hjälp av skruv och mutter, springorna tätas med byggsilikon. De två rörböjarna fästs samman med tre skruvar för att garantera att de inte separerar från varandra.



Figur 32 - Rörledning för fina partiklar och luft

4.10.9 Inlopp för sand

Inloppet för sand består av ett rör som går in genom en av rörböjarna vidare in i trumman, se röd komponent i *figur 33*. Inloppsröret har en ytterdiameter på 50 mm. Till inloppsröret kopplas en kona som används för att få ett jämt inflöde av sand.

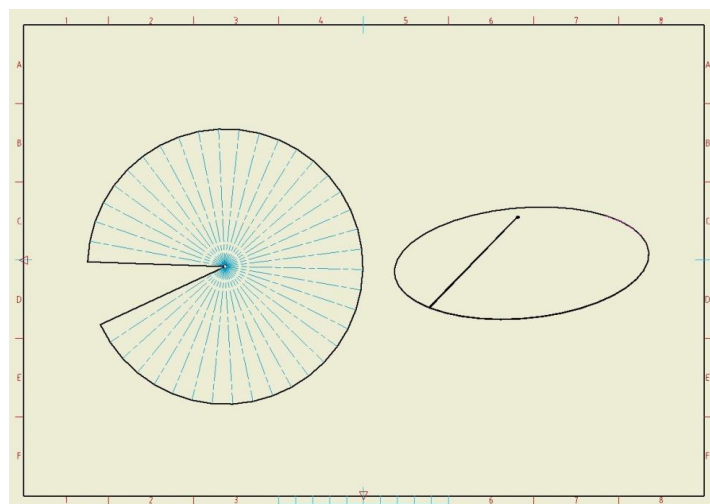


Figur 33 - Inloppsrörets position

4.10.10 Spridningskona för sandfördelning

Spridningskonan används för att ge en jämn fördelning av den inmatade sanden samt leda sanden en bit ut från centrum, se *figur 34*. Den tillverkades i en 1 mm plåt. Erforderlig geometri ritas ut på plåten och sågas ut i bandsåg. Plåten formas genom att med handkraft deformera den till slutlig geometri likt tillvägagångssättet hos konorna till trumman. För att hålla samman konan användes en MIG-svets för att punktsvetsa ihop de två skarvarna.

Inloppsrör för sand och spridningskonan är sammansatt via tre skruvar som löper genom dem båda och hålls i önskad höjd med hjälp av tre muttrar.



Figur 34 - Utbredningsritning av spridningskona

4.11 Färdig prototyp

En färdig vindsiktsprototyp har nu tillverkats, den syns i *figur 35*. Vindsikten har ett internt luftflöde, alltså sker inget luftutbyte med omgivningen. Fläktens placering gör att det bildas ett stigande cirkulärt luftflöde. Prototypen skiljer den sig från befintliga vindsiktar med internt luftflöde och tros vara unik genom att det teoretiskt sett aldrig behöver passera några större mängder partiklar genom luftkällan, i detta fall en fläkt vilket bidrar till minimalt slitage.



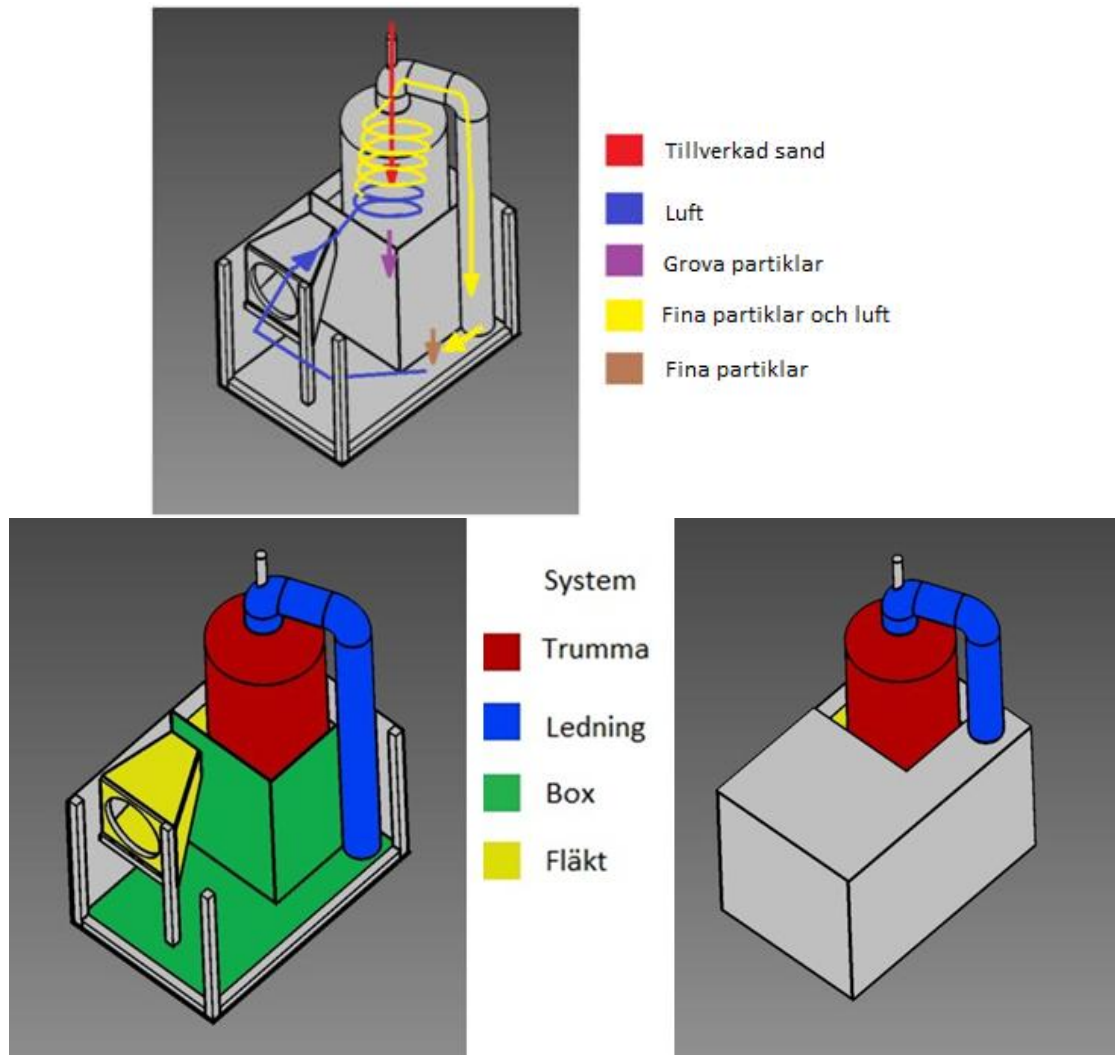
Figur 35 - Färdig prototyp

Vindsikten består i stort av ett fläktsystem, trumsystem, ledningssystem och boxsystem, dessa system syns i *figur 36 b*.

En sandmassa förs in i trumsystemet genom ett inloppsrör, vilket befinner sig längst upp i *figur 35*. Under detta inloppsrör sitter en spridningskona som gör att sanden kommer ut en bit från centrum inne i trumman. I trumman träffas sanden av en cirkulerande och stigande luftström skapad av fläktsystemet.

De finare partiklarna ur sandmassan övervinner tyngdkraften och stiger tillsammans med luftströmmen. De grova partiklarna har en större tyngdkraft och faller nedåt. Vissa partiklar som ligger på gränsen för att följa med luftströmmen, får en stor centrifugalkraft och slungas ut mot sidan av trumman. När de slår i trumväggen tappar de rörelseenergi och faller ner i en uppsamlingsplats. Ute vid trumväggen finns även ett gränsskikt där hastigheten är lägre, vilket även bidrar till att sänka hastigheten hos de större partiklarna.

De finare partiklarna följer med luftflödet ut ur toppen på trumman, genom ledningssystemet och ned i boxsystemet. I boxsystemet ökar arean vilket gör att lufthastigheten blir avsevärt lägre. Lyftkraften blir då mindre vilket gör att partiklarna faller till botten. Luften fortsätter att röra sig vidare men med lägre hastighet och sugs bort mot fläktsystemet. I fläktsystemet passerar luftflödet först genom fläkten. Sedan trycks luften genom den minskande inloppskanalen och lufthastigheten ökar avsevärt. Luften förs slutligen in i trummsystemet, där luften återigen möter inmatad sand. Sanden och luftens genomloppsbanor finns även illustrerat i *figur 36 a*.

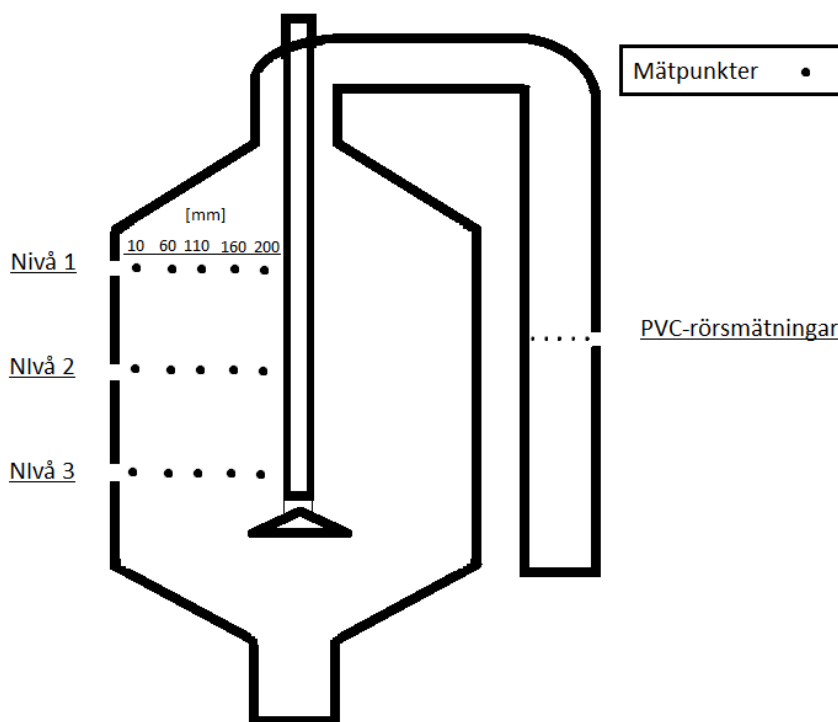


Figur 36 – a) Genomloppsbanor för medier b) Systembeskrivning

4.12 Luftflödesmätningar i trumma och utloppsrör

För att undersöka om lufthastigheterna överrensstämmer med beräkningar och strömningssimuleringar utfördes tester på vindsiktprototypen. Testernas syfte var att se om tillräckräcklig lyftkraft åstadkoms, samt kontrollera att ett rotationsmässigt homogent luftflöde erhöles i trummans alla nivåer.

Testerna på prototypen utfördes genom att använda förborrade hål på tre olika nivåer i trumman och ett förborrat hål i utloppsröret, visat i *figur 37*. De roterande hastigheterna mättes i trumman och medelhastighet i vertikalled mättes i utloppsröret. Ett Prandtlrör kopplat till en manometer fördes sedan in i hålen. Lufthastigheterna erhöles direkt från manometern.



Figur 37 - Mätpunkter för roterande och vertikala hastigheter

4.12.1 Roterande hastigheter

På de tre nivåerna, se *figur 37*, uppmättes hastigheten på fem olika djup, för att få fram en hastighetsprofil på varje nivå. Nivå 1 valdes till att vara högst upp i trumman en liten bit från avsmalningen vid konan. Nivå 3 placerades i samma höjd som spridningskonan inne i trumman. Nivå 2 placerades mitt mellan nivå 1 och nivå 3, vilket var 200 mm från båda hålen. Testerna utfördes med tre olika hastighetslägen, vid 50 %, 75 % och 100 % av maximal vridning på tyristorn. Resultatet presenteras i *tabell 6, 7 och 8* och anger roterande hastigheter i m/s på olika positioner in från trummans vägg mot centrum.

Tabell 7 - Roterande lufthastigheter för 50 % av tyristorläget [m/s]

| 50 % av tyristorläget | 10 mm | 60 mm | 110 mm | 160 mm | 200 mm |
|-----------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Nivå 1 | 2.4 | 2.8 | 3.9 | 4.7 | 2.0 |
| Nivå 2 | 2.1 | 2.6 | 3.6 | 3.7 | 0.4 |
| Nivå 3 | 2.2 | 2.6 | 3.2 | 4.0 | 2.1 |

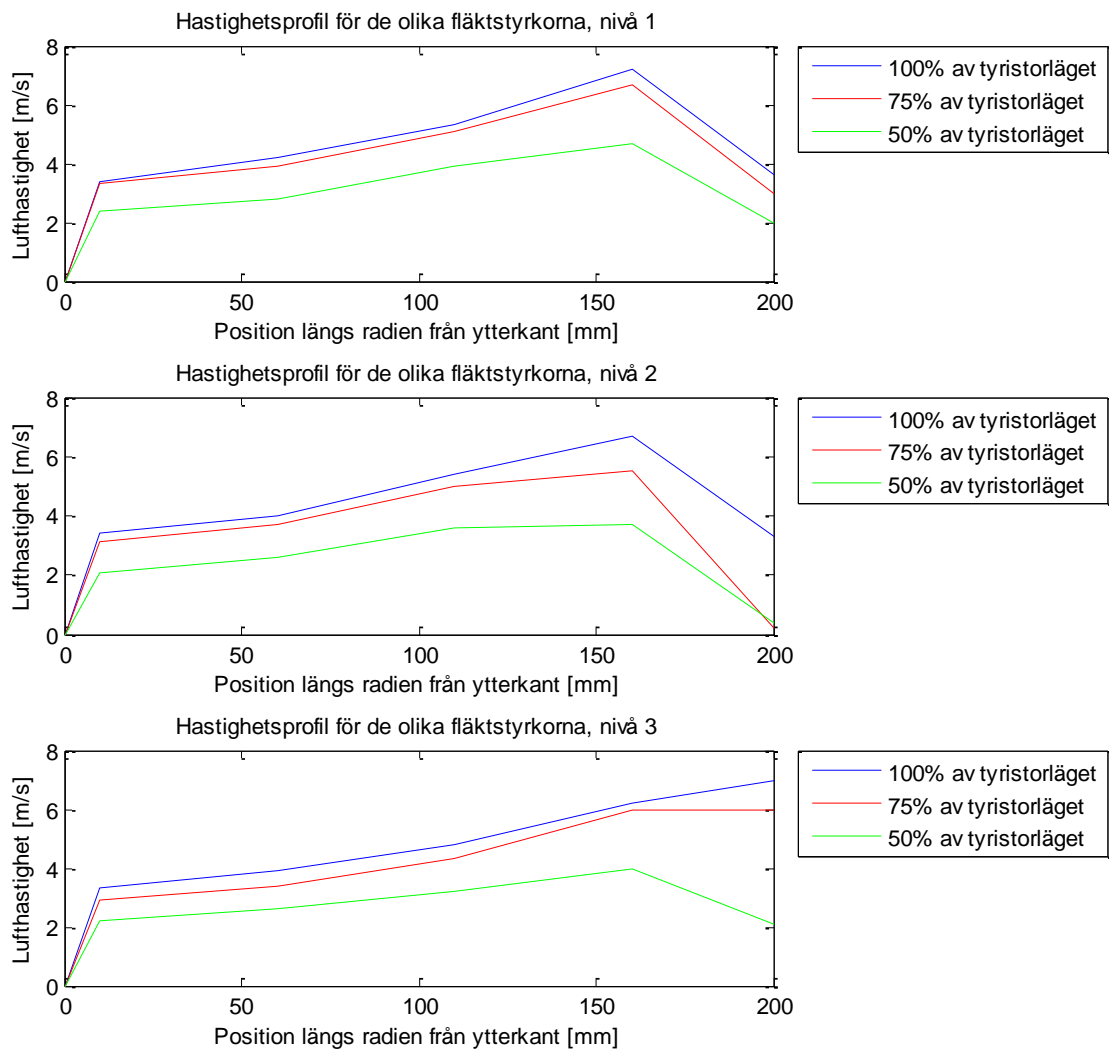
Tabell 8 - Roterande lufthastigheter för 75 % av tyristorläget [m/s]

| 75 % av tyristorläget | 10 mm | 60 mm | 110 mm | 160 mm | 200 mm |
|-----------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Nivå 1 | 3.3 | 3.9 | 5.1 | 6.7 | 3.0 |
| Nivå 2 | 3.1 | 3.7 | 5.0 | 5.5 | 0.2 |
| Nivå 3 | 2.9 | 3.4 | 4.3 | 6.0 | 6.0 |

Tabell 9 - Roterande lufthastigheter för 100 % av tyristorläget [m/s]

| 100 % av tyristorläget | 10 mm | 60 mm | 110 mm | 160 mm | 200 mm |
|------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Nivå 1 | 3.4 | 4.2 | 5.3 | 7.2 | 3.6 |
| Nivå 2 | 3.4 | 4.0 | 5.4 | 6.7 | 3.3 |
| Nivå 3 | 3.3 | 3.9 | 4.8 | 6.2 | 7.0 |

De uppmätta hastigheterna, beräknade av manometern, är medelhastigheter. Hastigheterna visade sig dock vara väldigt fluktuerande. Närmast centrum i trumman varierade hastigheterna som mest. Hastighetsprofilerna visualiserades för att bättre ge en överblick över hastighetsfördelningen från yttervägg in till centrum vid de olika nivåerna, se *figur 38*.



Figur 38 - Hastighetsprofiler för de olika fläktstyrkorna på de tre olika nivåerna

De uppmätta hastighetsprofilerna skilde sig från det väntade resultatet. Hastigheten förväntades vara högre närmare väggen, då inflödet av luft ligger tangentiellt med trummans vägg. Eftersom flödet roterar och ingen luft komprimeras bör hastigheten närmare väggen vara större än en position närmare centrum för att ge ett uniformt luftflöde.

Resultatet från mätningarna visar motsatsen till vad som förväntades. Luftflödet har störst hastighet ungefär 90 mm från centrum. Hastigheten närmast centrum fluktuerade väldigt mycket på grund av störningar i luftflödet från inmatningsröret. Värdet närmast centrum på alla nivåer bör därför beaktas med försiktighet.

Hastighetsprofilerna på de olika nivåerna har liknande utseende för alla thyristorlägen. Som förväntat varierar hastigheterna på de olika thyristorlägena men skillnaderna är inte så stora. Närmast väggen finns ett gränsskikt där hastigheten är lägre, detta går att urskilja i *figur 38*. Mellan störningarna från gränsskiktet vid ytterväggen och turbulensen vid inmatningsröret, är hastigheten relativt konstant. Detta tyder på att ett homogent rotationsflöde åstadkommit.

4.12.2 Vertikala hastigheter

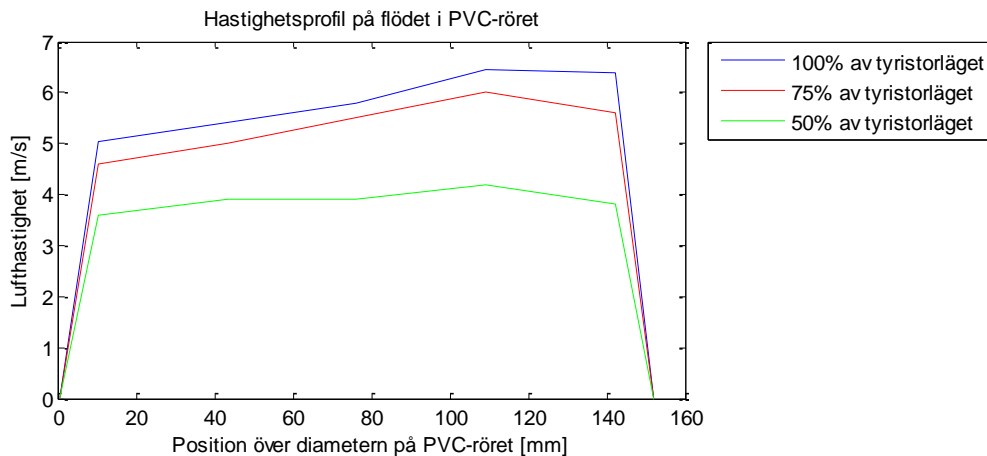
Det var inte möjligt att mäta vertikala hastigheter inuti trumman på grund av att det roterande flödet påverkade det statiska trycket i Prandtlröret. De vertikala hastigheterna fick istället mätas upp i utloppsröret. Luftflödet genom utloppsröret är enligt kontinuitetsekvationen detsamma som det stigande luftflödet i trumman. Ur medelhastigheten i utloppsröret kan ett luftflöde beräknas. En vertikal medelhastighet i trumman kan sedan räknas ut från detta luftflöde.

Hastigheten i utloppsröret mättes på fem olika punkter längs med utloppsrörets diameter. Hastigheten testades, precis som för de roterande hastigheterna, för tre olika fläktstyrkor. Resultaten för de vertikala hastighetsmätningarna i utloppsröret redovisas i nedan *tabell 10*.

Tabell 10 - Vertikala hastigheter i utloppsröret [m/s]

| | 10 mm | 43 mm | 76 mm | 109 mm | 142 mm |
|------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 50 % av tyristorläget | 5.1 | 5.5 | 5.8 | 6.5 | 6.4 |
| 75 % av tyristorläget | 4.6 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 5.6 |
| 100 % av tyristorläget | 3.6 | 3.9 | 3.9 | 4.2 | 3.8 |

Hastighetsprofilerna för de olika tyristorlägena, visualiseras nedan i *figur 39*. Formen på profilerna tyder på turbulenta flöden vid alla hastigheter i utloppsröret.



Figur 39 - Hastighetsprofiler på flödet i PVC-röret

Dessa hastigheter resulterade i att den vertikala medelhastigheten i trumman kunde beräknas till följande värden, se *tabell 10* nedan.

Tabell 11 - Vertikal medelhastighet i trumma

| Varvtal | Vertikal medelhastighet i trumman [m/s] |
|------------------------|---|
| 50 % av tyristorläget | 0,36 |
| 75 % av tyristorläget | 0,49 |
| 100 % av tyristorläget | 0,54 |

De beräknade hastigheterna i trumman är alldeles för låga för att vindsikten skall fungera, vilket antyder på att mätningarna är felaktiga. Utifrån fläktens specifikationer, gällande flödet, är de uppmätta hastigheterna nästan en faktor 10 fel. De felaktiga mätningarna beror sannolikt på att det skapas ett turbulent flöde ned i utloppsröret. Det stigande roterande flödet från trumman trycks ner igenom ett rör med liten tvärsnittsarea. Hastigheten ökar då radikalt och flödet fortsätter troligen rotera. Den turbulens som då skapas påverkar mätinstrumentet. Flödet kunde istället mätts upp med en flödesmätare, dock fanns inte någon i rätt storlek tillgänglig.

4.13 Test med maskinsand i vindsiktsprototypen

En hink med 6 kg krossat stenmaterial fanns tillgänglig för testning av vindsikten. Innan testerna utfördes i vindsikten, siktades sanden med siktdäck för att få reda på storleksordningen av de olika partikelfraktionerna. Siktning med siktdäck kunde maximalt utföras i omgångar av 600 g varför testerna utfördes i multipler av 600 g.

Testerna utfördes i två sekvenser. *Sekvens 1* där vindsiktens funktion prövades med tre olika fläkteffekter och *Sekvens 2* där tester utfördes på de två mest intressanta fläkteffekterna med mer material. Till båda sekvenser användes en kona för inmatning av sand. Konan förhindrar att luft sögs in genom inloppsröret och gav ett massflöde av sand på 120 kg/h. Tidtagning av massflödet hos 6 stycken 1kg massor utfördes för att verifiera massflödet.

Tre olika fläkteffekter användes vid testerna. Alla är baserade på lägen som tyristor har, 100 %, 75 % och 50 % av tyristorns lägesspann. Vid 0 % på tyristorns spann ges dock fortfarande en fläkteffekt. Detta innebär att lufthastigheten är maximal vid 100 % dock ger tyristor läget på 75 % och 50 % inte en lufthastighet på 75 % respektive 50 % av maxhastigheten.

Tyristorläget 100 % antas ge ett luftflöde på 3500m³/h eftersom fläktspecifikationerna anger det. Ur detta kan en lufthastighet och således en lyftkraft beräknas.

På grund av bristfälliga mätningar och avsaknad av korrekt mätutrustning kunde inte lufthastigheterna beräknas för 75 % och 50 % av tyristorläget. Samband som har med lufthastigheter att göra är därför svåra att urskilja.

4.13.1 Sekvens 1 - Tre test med fläktstyrka 100 %, 75 % och 50 %

Till *Sekvens 1* siktades 1800 g med siktdäck i tre etapper med 600 g åt gången. Det visade sig att de tre resultaten var relativt lika. Den totalt siktade massa på 1800 gram blandades samman ordentligt och delades upp i tre hinkar vardera bestående av 600 g. Innehållet i hinkarna antogs ha samma andelar av de olika fraktionerna. För vardera hink utfördes ett test på 100 %, 75 % respektive 50 % av tyristorläget. Massinflöde till alla dessa test var 120 kg/h.

Intressant att observera under dessa tester var hur sanden skulle fördelas i den fina respektive grövre produktens uppsamlingsplats, hur mycket sand och hur stora andelarna av de olika fraktionerna sandmassorna består av. Det var också intressant att se om systemet var helt slutet eller om det fanns några läckage i byggnationen.

4.13.2 Resultat från tester på sekvens 1

Partikelfraktionerna som samlades i den grova produktens uppsamlingsplats var enkla att ta vara på då de föll rakt ner i en hink. Uppsamling av de finare partikelfraktionerna var inte alls lika effektiv. Stor del av de fina partiklarna var utspridda i lådan och satt fast på både väggar och golv. De var väldigt svåra att samla upp på grund av sin storlek samt att de begav sig upp i luften som damm vid försök till uppsamling med en sopborste. Det gick att urskiljas ett område i botten av lådan som samlade upp mer fina partiklar, men dessa mängder var vid testet väldigt små. Vid tester med större massa bör det därför vara möjligt att analysera den finare produkten.

Eftersom de fina partiklarna var så svåra att samla in gjordes ett antagande att stor del av sandmassan som inte hamnat i den grova produktens uppsamling har följt med luftflödet och befinner sig i uppsamlingen för fina partiklar. Ur detta antagande valdes att endast analysera den grova produkten. Den grova produkten analyseras genom siktning i siktdäck, för att ta reda på andelarna av de olika fraktionerna. Eftersom det bara är de grova produkterna som är av intresse förbises ingen nyttig information bort.

Efter vindsiktningen bestod de grova produkterna av 510.9 g, 543.0 g och 463.85 g för tyristorstegen 100 %, 75 % respektive 50 %, se *tabell 11*. I tabellen redovisas fraktionernas massa innan vindsiktningen och hur stor del av den totala massan de utgör. Vidare redovisas fraktionernas massa efter att tester på 100 %, 75 % och 50 % gjorts och produkten utvärderats med siktdäck. De olika fraktionernas massa och hur stor del av den totalt kvarvarande massan de utgör redovisas också i samma tabell.

Tabell 12 - Resultat hos den grova produkten ifrån de tre vindsiktningarna

| Partikelstorlek [mm] | Innan vindsiktning | | 100% fläkteffekt | | 75% fläkteffekt | | 50% fläkteffekt | |
|----------------------|--------------------|--------------|------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | 600 gram | Andel [%] | Produkt [g] | Andel [%] | Produkt [g] | Andel [%] | Produkt [g] | Andel [%] |
| 0 <x< 0,063 | 76,90 | 12,8 | 30,86 | 6,0 | 35,33 | 6,5 | 19,69 | 4,2 |
| 0,063 <x< 0,125 | 72,82 | 12,1 | 60,03 | 11,7 | 67,67 | 12,5 | 44,16 | 9,5 |
| 0,125 <x< 0,25 | 101,20 | 16,9 | 100,46 | 19,7 | 103,00 | 19,0 | 85,97 | 18,5 |
| 0,25 <x< 0,5 | 96,85 | 16,1 | 101,45 | 19,9 | 101,19 | 18,6 | 99,48 | 21,4 |
| 0,5 <x< 1 | 105,94 | 17,7 | 89,01 | 17,4 | 96,83 | 17,8 | 93,90 | 20,2 |
| 1 <x< 2 | 114,82 | 19,1 | 97,60 | 19,1 | 107,09 | 19,7 | 92,05 | 19,8 |
| 2 <x< 4 | 31,46 | 5,2 | 31,49 | 6,2 | 31,88 | 5,9 | 28,61 | 6,2 |
| Totalt | 600,00 | 100,0 | 510,9 | 100,0 | 543,00 | 100,0 | 463,85 | 100,0 |

Alla fläkteffekter gav resultat som visade på en minskning av partiklar. Främst minskades andelen av de finare partiklarna vilket eftersträvades. Intressant från dessa tester var att den grova produkt som innehöll minst andel fina partiklar kom från testet med lägst fläkteffekt, tyristorsteg 50 %. Det är även i detta test som störst mängd total sandmassa klasserats bort.

Detta var oväntat då en större hastighet från början antogs dra med mer fina partiklar. Resultatet kan ha berott på olika faktorer.

Vid höga hastigheter kan turbulens orsakat underliga strömningsbeteenden och resulterat i att mindre mängd sandmassa har klasserats. Parametrar som att de tre sandmassorna antogs ha en medelvärdes blandning innan test kan också varit avgörande.

Det kan även vara så att testerna pågick under för kort tid. Det är inte självklart att processen skulle ge samma resultat om testerna skulle utföras, med samma massflöde, under en längre period. Det är möjligt att processen inte hann stabilisera sig.

Från detta följde intresse av att undersöka två av flödes hastigheterna av luft ytterligare. Denna gång med större mängd sand, vilket borde ge ett mer realistiskt resultat, då vindsiktare ute i industrin körs mer kontinuerligt.

4.13.3 Sekvens 2 – Två utförligare tester med fläktstyrka 100 % och 50 %

Sekvens 2 gick ut på att testa vindsikten med fläkteffekterna vid tyristorstegen 100 % och 50 %, eftersom det var de två fläktstyrkorna som gav bäst resultat från testerna i Sekvens 1. Innan testerna utfördes upprättades två separata sandmassor med 1800 g vardera. Dessa siktades i siktdäck för att få utförliga värden av hur hela testprodukternas fraktioner var andelsuppdelade.

De större testmassorna på 1800 g användes för att få en mer rättvis bild av hur väl vindsiktens funktion utfördes. I Sekvens 2 utfördes två olika tester. Test 1 med 100 % av tyristorläget och Test 2 med 50 % av tyristorläget. Båda testerna utfördes med 1800 g maskinsand samt ett massflöde på 120 kg/h.

4.13.3.1 Test 1 – Test med 100 % fläktstyrka och 1800 g maskinsand

Test 1 utfördes med tyristor inställd på 100 % samt ett sandmassflöde på 120 kg/timme med en total sandmassa på 1800 gram. Sandmassan som matades in i vindsikten före Test 1 redovisas i tabell 12 nedan.

Tabell 13 - Fraktioner av material innan vindsiktning, test 1

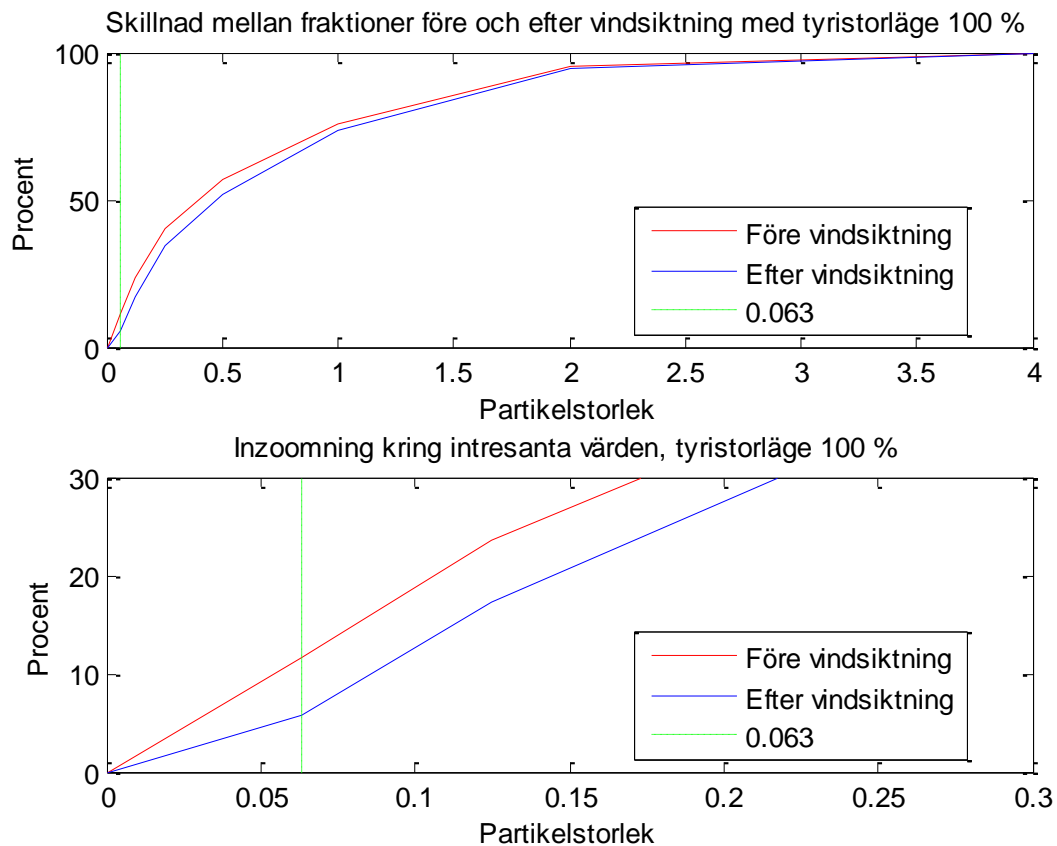
| Partikelstorlek [x mm] | Siktning 1 [g] | Siktning 2 [g] | Siktning 3 [g] | Sammanlagt [g] | Andel [%] |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| 0 <x< 0,063 | 82,8 | 58,1 | 67,4 | 208,3 | 11,59 |
| 0,063 <x< 0,125 | 71,7 | 77,3 | 67,3 | 216,3 | 12,04 |
| 0,125 <x< 0,25 | 89 | 101,1 | 107,6 | 297,7 | 16,56 |
| 0,25 <x< 0,5 | 90,1 | 94 | 111,1 | 295,2 | 16,43 |
| 0,5 <x< 1 | 118,8 | 110,2 | 116,3 | 345,3 | 19,21 |
| 1 <x< 2 | 118,3 | 118,2 | 111,6 | 348,1 | 19,37 |
| 2 <x< 4 | 22,9 | 38,2 | 25,2 | 86,3 | 4,80 |
| Totalt | 593,6 | 597,1 | 606,5 | 1797,2 | 100,00 |

Sandmassan som erhölls i den grova produkten efter Test 1 med vindsikten redovisas i tabell 13 nedan.

Tabell 14 - Vindsiktad produkts fraktioner med 100 % på tyristorläget

| Partikelstorlek [x mm] | Siktning 1 [g] | Siktning 2 [g] | Siktning 3 [g] | Sammanlagt [g] | Andel [%] |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| 0 <x< 0,063 | 31,9 | 26,9 | 32,6 | 91,4 | 5,71 |
| 0,063 <x< 0,125 | 72 | 52,7 | 60,6 | 185,3 | 11,58 |
| 0,125 <x< 0,25 | 127,5 | 78,8 | 68,9 | 275,2 | 17,20 |
| 0,25 <x< 0,5 | 128 | 92 | 62,8 | 282,8 | 17,68 |
| 0,5 <x< 1 | 133,5 | 137,3 | 70,6 | 341,4 | 21,34 |
| 1 <x< 2 | 95 | 148,9 | 92,5 | 336,4 | 21,03 |
| 2 <x< 4 | 21,3 | 38,7 | 27,2 | 87,2 | 5,45 |
| Totalt | 609,2 | 575,3 | 415,2 | 1599,7 | 100,00 |

Ovanstående data används för att enkelt visualisera hur fraktionerna klasseras bort, se *figur 40*. Grafen är konstruerad så andelen av fraktionerna efter hand summeras samman. Alltså är summan 0 vid start och 100 % vid grövsta fraktionen. Den röda linjen visar samband mellan fraktionerna innan vindsiktning och den blå visar samband efter vindsiktning. Genom att jämföra dessa mot varandra kan man se att en stor andel av de finaste partiklarna klasseras bort medan de grövre partiklarna kvarstår.



Figur 40 - Skillnad mellan fraktioner före och efter vindsiktning

Efter test undersöktes den grova produkten, det gick visuellt att upptäcka att det allra översta lagret bestod av finare partiklar som låg ansamlade. De fina partiklarna överst i den grova produkten kan vara ett tecken på att det funnits mycket fina partiklar cirkulerande i maskinen, som sedan fallit ner då maskinen stängdes av. Detta kan ses som en randeffekt vid stop av maskinen och kontinuerliga körningar bör minska denna effekt. Alltså kan tänkas att produkten vid en kontinuerlig körning innehåller mindre fina partiklar än vad som erhöles vid testning.

Andelen av partiklar i intervallet 0 – 0,063 millimeter minskade från 11,59 procent till 5,71 procent och är den fraktion som har minskat mest, vilket var det önskade resultatet. Att komma till en så pass låg nivå är ett lyckat resultat. Detta resultat illustreras i figur 40 där vi ser att andelen partiklar har minskat i de små fraktionerna, medan de grövre fraktionerna kvarstår. Effektivitetsberäkningar utfördes för de olika fraktionerna med *ekvation 6, kapitel 2.5* och gav *tabell 14* nedan.

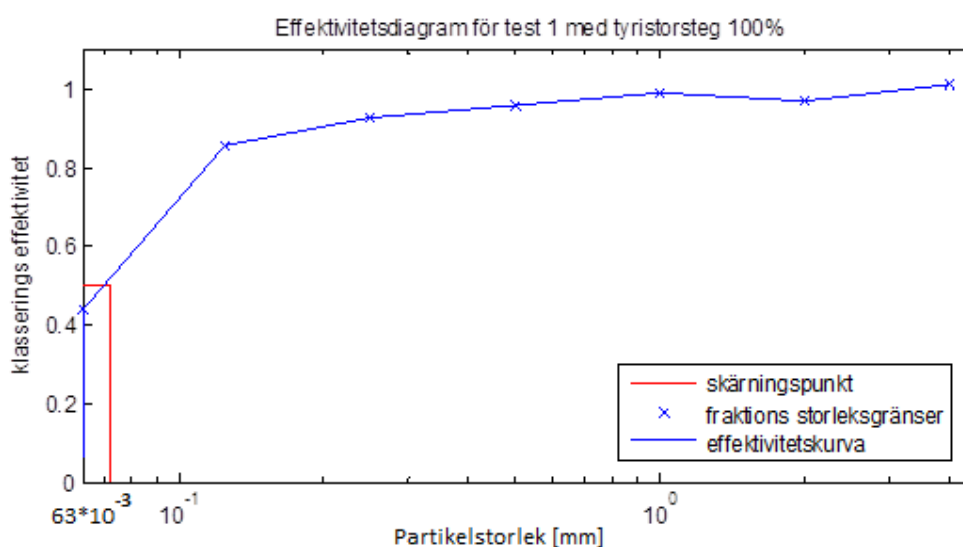
Tabell 15 - Effektivitet i varje fraktion, test 1

| Effektivitet test 1 | |
|------------------------|----------------|
| Partikelstorlek [x mm] | Effektivitet % |
| 0 <x< 0,063 | 43,88 |
| 0,063 <x< 0,125 | 85,67 |
| 0,125 <x< 0,25 | 92,44 |
| 0,25 <x< 0,5 | 95,80 |
| 0,5 <x< 1 | 98,87 |
| 1 <x< 2 | 96,64 |
| 2 <x< 4 | 101,04 |

Linjäritet antogs råda i fraktionsspannen. Enligt teori kan skärningspunkten antas befinna sig där effektiviteten är 50 %. Genom att interpolera i spannet 0,063 mm till 0,125 mm, där effektiviteten går från 43,9 % till 85,7 %, kunde skärningspunkten beräknas till 0,0721 mm. Denna illustreras i *figur 41*.

Uträkningar från beräkningsdelen, *kapitel 4.2*, visar på att skärningspunkten borde ligga vid 0.16 mm med ett luftflöde på 3410 m³/h. Skärningspunktens värde från testet ligger alltså avsevärt lägre än var den antogs ligga med grund från teorin.

Värdet för skärningspunkten är framtaget genom en antagen linjäritet inom fraktionsspannen. Därför är *figur 41* lite missvisande, eftersom den är ritad med logaritmisk linjäritet mellan fraktionerna. Den utritades inte i vanlig linjär skala, då skärningspunktens position hade varit svår att avläsa. Nu syns fraktioner mer tydligt då små värden får större utrymme på x-axeln i en semilogaritmisk graf.



Figur 41 - Effektivitetsdiagram för test 1 med tyristorsteg 100 %

4.13.3.2 Test 2 - Test med 50 % fläktstyrka och 1800 gram maskinsand

Test 2 utfördes med tyristor inställd på 50 % samt ett sandmassflöde på 120 kg/h med en total sandmassa på 1800 g. Sandmassan som matades in i vindsikten före Test 2 redovisas i tabell 15 nedan.

Tabell 16 - Fraktioner av material innan vindsiktning, test 2

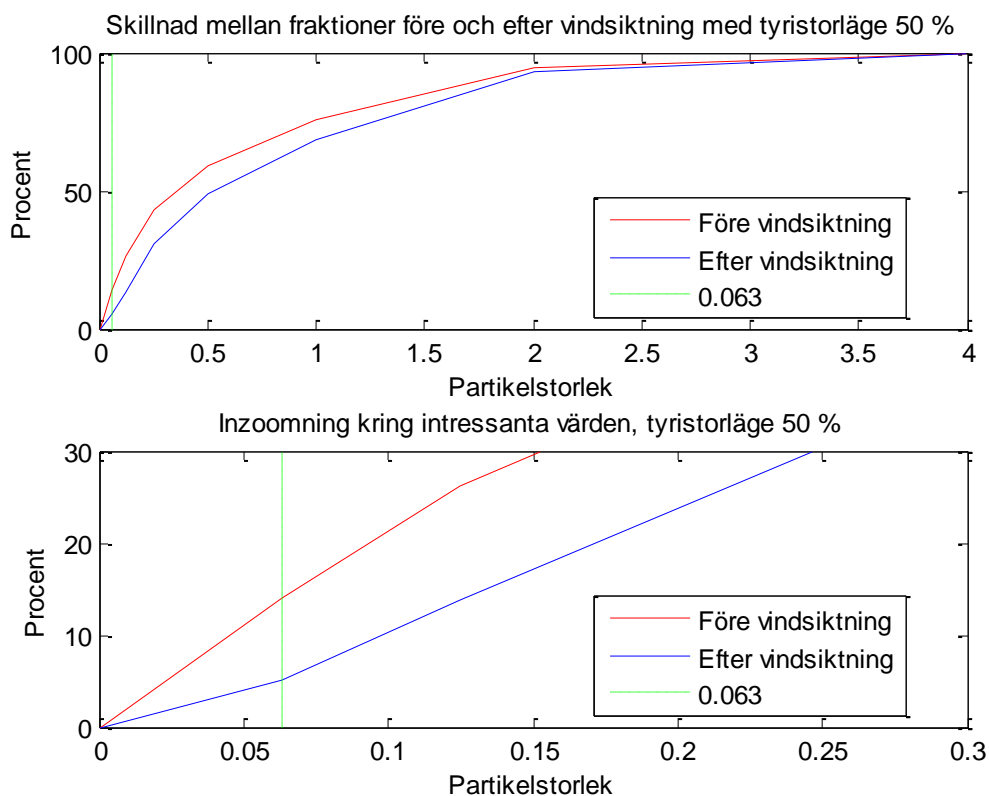
| Partikelstorlek [x mm] | Siktning 1 [g] | Siktning 2 [g] | Siktning 3 [g] | Sammanlagt [g] | Andel [%] |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| 0 <x< 0,063 | 86,1 | 81,9 | 84,2 | 252,2 | 14,04 |
| 0,063 <x< 0,125 | 74,1 | 76 | 69,7 | 219,8 | 12,24 |
| 0,125 <x< 0,25 | 105,8 | 103,5 | 99 | 308,3 | 17,17 |
| 0,25 <x< 0,5 | 98,9 | 94,4 | 91,5 | 284,8 | 15,86 |
| 0,5 <x< 1 | 97,2 | 96,8 | 95,1 | 289,1 | 16,10 |
| 1 <x< 2 | 112,2 | 115,1 | 112,2 | 339,5 | 18,91 |
| 2 <x< 4 | 35,3 | 33,7 | 33,1 | 102,1 | 5,69 |
| Totalt | 609,6 | 601,4 | 584,8 | 1795,8 | 100,00 |

Sandmassan som erhöles i den grova produkten efter Test 2 med vindsikten redovisas i tabell 16 nedan.

Tabell 17 - Vindsiktad produkts fraktioner med 50 % på tyristorläget

| Partikelstorlek [x mm] | Siktning 1 [g] | Siktning 2 [g] | Siktning 3 [g] | Sammanlagt [g] | Andel [%] |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| 0 <x< 0,063 | 33,4 | 29,7 | 5,9 | 69 | 5,12 |
| 0,063 <x< 0,125 | 55,9 | 50,3 | 9,9 | 116,1 | 8,61 |
| 0,125 <x< 0,25 | 108,8 | 96 | 20,6 | 225,4 | 16,72 |
| 0,25 <x< 0,5 | 116,9 | 109,6 | 23,8 | 250,3 | 18,57 |
| 0,5 <x< 1 | 117,9 | 118,2 | 31,1 | 267,2 | 19,82 |
| 1 <x< 2 | 125,1 | 148,6 | 51,8 | 325,5 | 24,15 |
| 2 <x< 4 | 33,6 | 45,3 | 15,6 | 94,5 | 7,01 |
| Totalt | 591,6 | 597,7 | 158,7 | 1348 | 100,00 |

Ovanstående data används för att enkelt visualisera hur fraktionerna klasseras bort, se *figur 42*. Grafen är konstruerad så andelen av fraktionerna efter hand summeras samman. Alltså är summan 0 vid start och 100 % vid grövsta fraktionen. Den röda linjen visar samband mellan fraktionerna innan vindsiktning och den blå visar samband efter vindsiktning. Genom att jämföra dessa mot varandra kan man se att en stor andel av de finaste partiklarna klasseras bort medan de grövre partiklarna kvarstår.



Figur 42 - Skillnad mellan fraktioner före och efter vindsiktning

Som syns i *tabell 16* gav *Test 2* ett stort bortfall av sand. Mycket fina partiklar klasserades bort och den grova produkten bestod endast 5.12% fina partiklar. Man kan tydlig se i *figur 42* att det är en stor del av de fina partiklarna som klasserats bort, men även att partiklar i större fraktioner har försvunnit.

Varför en stor del av de större fraktionerna försvunnit undersöktes efter test och det visade sig att en större sandmassa fastnat i nedloppskonan under trumman. Avsaknad av grövre partiklar konstaterades även i *sekvens 1* vid test med tyristorsteg 50 %.

Lutningen på nedre i trumman kan ha varit för liten för att tvinga sanden att bege sig nedåt, samtidigt som sanden inte träffas av en lika hög lufthastighet. Rande effekter från stop syntes i den grova produkten, vilket innebar en ansamling av fina partiklar längst upp i produkten som likt tidigare test kan ha påverkat resultatet.

I detta test har andelen partiklar i de två fraktionerna med minst partikelstorlek minskat mest, främst den minsta fraktionen. Den finaste fraktionen minskade från 14 % till 5,1 %, vilket är positivt. Effektivitetsberäkningar utfördes även i detta fall för de olika fraktionerna med *ekvation 6* och gav *tabell 17* nedan.

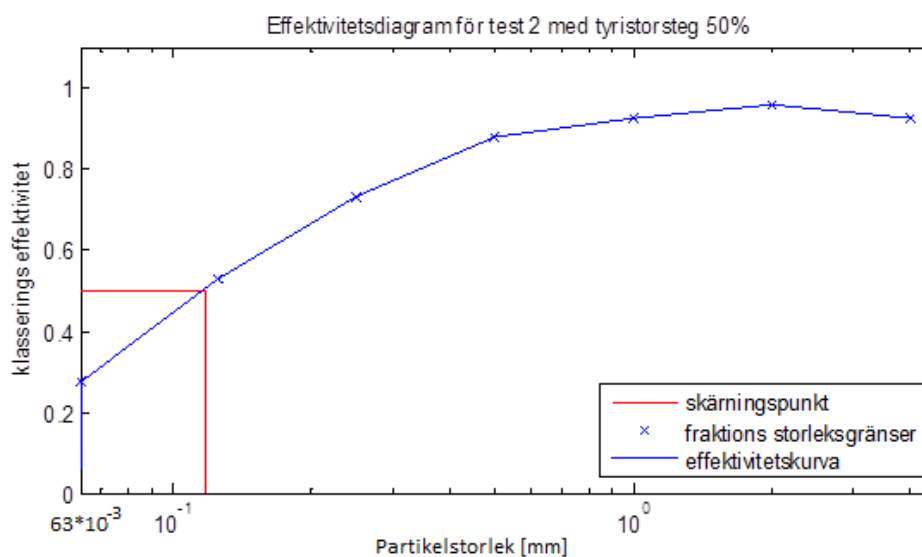
Tabell 18 - Effektivitet i varje fraktion, test 2

| Effektivitet test 2 | |
|------------------------|----------------|
| Partikelstorlek [x mm] | Effektivitet % |
| 0 <x< 0,063 | 27,36 |
| 0,063 <x< 0,125 | 52,82 |
| 0,125 <x< 0,25 | 73,11 |
| 0,25 <x< 0,5 | 87,89 |
| 0,5 <x< 1 | 92,42 |
| 1 <x< 2 | 95,88 |
| 2 <x< 4 | 92,56 |

Linjäritet antogs råda även i dessa fraktionsspänn. Enligt teori kan skärningspunkten antas befinna sig där effektiviteten är 50 %. Genom att interpolera i spannet 0,063 mm till 0,125 mm, där effektiviteten går från 27.36 % till 52.82 %, kunde skärningspunkten beräknas till 0.1181mm. Denna illustreras i *43*.

Värdet för skärningspunkten är framtaget genom en antagen linjäritet inom fraktionsspännen. Därför är *figur 43* lite missvisande, eftersom den är ritad med logaritmisk linjäritet mellan fraktionerna. Den utritades inte i vanlig linjär skala, då skärningspunktens position hade varit svår att avläsa. Nu syns fraktioner mer tydligt då små värden får större utrymme på x-axeln i en semilogaritmisk graf.

Skärningspunkten som fås ut från tester går inte att jämföras med några beräkningar eftersom lufthastigheterna för tyristorsteg 50 % är okänt, på grund av bristfälliga mätningar och avsaknad av korrekt mätutrustning.



Figur 43 - Effektivitetsdiagram för test 2 med tyristorutslag 50 %

4.14 Analys av resultat

Genom att titta på lutningen hos kurvan kring skärningspunkten, se *figur 41 och 43*, ses att *Test 1* med tyristorsteg på 100 %, hade en högre lutning än *Test 2* med tyristorsteg på 50 %. Den högre lutningen innebär att skärningspunkten är skarpare i *Test 1*. Detta beror på att den största andelen som försvann vid *Test 1* kom från den minsta fraktionen, medan det som försvann vid *Test 2* kom från de tre minsta fraktionerna. Som tidigare nämnts beror detta bortfallet på grund av att en stor mängd sand fastnade i nedloppskonan. Vid lägre hastigheter föll inte detta ner lika lätt utan låg då kvar i konan. Detta syns i *tabell 16* som visar att *Test 2* fick ett större bortfall av sand än *Test 1*. Den grova produkten från *Test 1* bestod av totalt 1599.7 g medan den från *Test 2* bestod av totalt 1348.0 g.

Båda testerna av större sandmassor gav resultat som visade på en stor minskning av fina partiklar vilket är väldigt positivt. På grund av ofullständiga mätningar kan i dagsläget inte något samband mellan lufthastigheten och skärningspunkten urskiljas.

Varför den högre lufthastigheten fick ett sämre utslag vid separering av de mindre partiklarna än den lägre hastigheten kan bero på faktorer som turbulens men tillfälligheter som randeffekter vid stopp kan också varit avgörande. Turbulensen observerades tidigare under lufthastighetstesterna i maskinen men i vilken utsträckning denna kan varit avgörande för resultatet är oklart men värt att ha i åtanke. Separeringen vid den högre lufthastigheten gick från 11.59 % till 5.71 % av den finaste fraktionen, det gav en effektivitet på 43.88 %. Separeringen vid den lägre lufthastigheten gick från 14.04% till 5.12% vilket gav en effektivitet på 27.36 %. I de fall där fraktionen är icke önskvärd i slutprodukten är en låg effektivitet bäst. De fraktioner man vill behålla bör ha däremot ha en hög effektivitet. Tyristorläget vid 50 % gav således det bästa resultatet i jämförelse av effektivitet i den minsta fraktionen.

Vid tester observerades ett läckage i byggnationen mellan fläkten och trumman, där en liten del fina partiklar tog sig ut. Att partiklar tog sig ut ur systemet just där innebär att det troligen cirkulerar en del fina partiklar genom hela systemet. Detta kan åtgärdas genom att maskinen utrustas med ett större separationsområde för de fina partiklarna. I utförda tester har lådan varit för liten för att de minsta partiklarna skall ansamlas och har istället följt med luften.

Att fina partiklar återcirkulerar i systemet kan ha gett utslag på mätresultaten i den grova produkten då all sand i trumman faller neråt i den vid stopp av fläkt och hamnar i slutprodukten. Kontinuerlig körning borde innebära en slutprodukt med mindre andel fina partiklar.

5 Diskussion

I detta avsnitt diskuteras och analyseras delar av resultatet som anses viktiga att påpeka. Avvikande resultat identifieras och uppkomsten diskuteras.

5.1 Fläktens rotationsflöde

Alla fläktar av axiell typ ger mer eller mindre upphov till någon form av roterande flöde likt en spiral. Eftersom fläktens datablad inte specificerade någon roterande hastighetskomponent för fläkten och för att tid inte fanns för att undersöka detta togs det inte hänsyn till fläktens roterande flöde vid flödesberäkningar. Den roterande hastighetskomponenten har dock inget att göra med det luftflöde som *ebm-papst* anger, då det endast är den komponent som är vinkelrät mot fläkten som bidrar till luftflödet. Däremot gör det roterande flödet att det går åt mer effekt för att nå upp till luftflödet som *ebm-papst* anger.

Den roterande hastighetskomponenten kan säkert påverka klassificeringen på flera sätt. Dels gör den att hela flödet blir turbulent i inloppsröret och därmed också inne i trumman vilket gör det omöjligt att modellera och förutspå hur det kommer påverka klasseringen. Riktningen (medurs eller moturs) på det roterande flödet kan också påverka klasseringen. Eftersom fläkten placeras så att den tangerar in på vänster sida om trumman innebär det att den roterande hastighetskomponenten kommer att vara riktad moturs. Det gör i sin tur att den roterande hastighetskomponenten kommer att peka uppåt i centrum av trumman och neråt vid trummans väggar. Det är dock väldigt oklart hur mycket det här skulle kunna påverka klasseringen och om det fyrkantiga inloppsröret inte hindrar den roterande hastighetskomponenten från fläkten. Med tanke på att luft har en låg viskositet borde det inte påverka allt för mycket. För att säkerställa att någon roterande hastighetskomponent inte uppkommer kan ett spjäll monteras i inloppsröret som tvingar det roterande flödet att bli rakt och på så sätt öka den raka hastighetskomponenten.

När flödet från fläkten kommit in tangentiellt i trumman tvingas det till att rotera runt i trumman. Det gör att det blir osäkert om det roterande flödet från fläkten finns kvar eller om det försvinner efter att det cirkulerat några varv i trumman och därmed också inte längre påverkar klasseringen.

5.2 Mätningar av luftflöde i vindsiktsprototypen

Mätningarna av det roterande flödet som utfördes med Prandtlrör visade på stora hastighetsvariationer vid de olika radiella positionerna i trumman. Den högsta roterande hastigheten i trumman uppmättes på en radiell position av 90 mm från centrum av trumman, med undantag från hastigheten närmast spridningskonan. Denna hastighet varierade väldigt mycket, troligtvis på grund av att turbulens uppstår i större utsträckning här. Det bör dock tilläggas att mätosäkerheten av flödehastigheten uppskattningsvis var hög även om de uppmätta hastigheterna var förhållandevis stabila.

Formeln som användes av mätinstrumentet för att beräkna den lokala hastigheten lyder:

$$v = \sqrt{\frac{2 * (p_0 - p_s)}{\rho}} \quad (22)$$

Där p_0 är stagnationstrycket, p_s är det statiska trycket och ρ i det här fallet är luftens densitet. Anledningen till en mätosäkerhet, nära centrum av trumman, för det roterande flödet beror troligtvis på att det statiska trycket påverkades av turbulens. Det statiska trycket blev då högre, vilket ger att differensen $p_0 - p_s$ blir lägre och således blir den uppmätta hastigheten lägre. Den uppmätta hastigheten på det roterande flödet är alltså troligtvis lägre än den verkliga hastigheten.

Mätningen av det vertikala flödet i utloppsröret gav en genomsnittlig hastighet 5.82 [m/s] vid tyristorläget 100 %. Med denna hastighet fås ett flöde på:

$$Q = 3600 * v * \pi * r^2 = 3600 * 5.82 * \pi * 0.076^2 \cong 380 [m^3/h] \quad (23)$$

Detta är nästan en faktor 10 mindre än vad fläkten ska ge vid obelastat tillstånd. Att de viskösa strömningsförlusterna ska vara så stora är föga troligt med tanke på luftens låga viskositet. Hastighetsprofilen i utloppsröret tyder på ett turbulent flöde, varför mätvärdena antas vara för låga. Det är möjligt att en roterande komponent hos flödet i trumman kvarstår då luften beger sig ner i utloppsröret. En roterande hastighetskomponent påverkar mätningen likt mätningen av det roterande flödet i trumman. Det är alltså inte så konstigt att de uppmätta värdena blir lägre än de verkliga värdena.

Fläkten placerades med hänsyn till dess roterande flöde så att flödet från fläktens rotation blir riktat uppåt i centrum av trumman och då nedåt vid trummans vägg. De partiklar som hamnar nära trummans vägg (de stora) utsätts av en kraft från det roterande flödet som pekar nedåt. De partiklar som hamnar nära centrum av trumman utsätts på liknande sätt för en kraft som här blir riktad uppåt.

5.3 Tester med maskinsand i vindsiktsprototypen

Testerna med maskinsand gav goda resultat men oklara samband mellan lufthastighet och skärningspunkt. Hypotesen före testerna var att en högre lufthastighet skulle ge en högre skärningspunkt, då den förväntades dra med mer material av de finare fraktionerna. Dock var så inte fallet då den lägre lufthastigheten gav en lägre skärningspunkt och klasserade mindre andel av de finare partiklarna.

Parametrar som kan varit direkt avgörande för att denna hypotes inte stämde kan härledas till att en del sand fastnade inne i trumsystemet. Detta ger en stor felmarginal i mätvärdena. Turbulens kan mer troligt ägt rum vid den högre lufthastigheten. Den kan ha orsakat att färre partiklar följde med luftströmmen uppåt.

Randeffekter vid stop är ytterligare en parameter som kan varit direkt avgörande för att hypotesen inte stämde. Dess effekt var tydlig vid inspektion av den grova produkten då en stor del av ytskiktet bestod av finare partiklar som antagligen fallit ner när fläkten stängts av. De fina partiklarnas påverkan antas spela större roll då den grova produktens massa är liten än om test skulle utföras på en större mängd sand. Det är svårt att veta vilket av testen som påverkats mest av denna effekt.

Under *Test 2* försvann hela 25 % av fraktionen mellan 0.125 till 0.25 mm detta kan ha berott på att den tillverkade sanden som användes till testerna innehöll stora mängder glimmer. Glimmer har en plattare geometri jämfört med vanliga sandpartiklar som gör att lyftkraft från luftflödet är mycket större, varför de lättare följer med luften. Varför detta inte skedde vid *Test 1* som hade en högre lufthastighet kan även i detta fall berott på en faktor som turbulens.

Glimmerpartiklarnas geometri och vikt har inte samma förhållande som en vanlig sandpartikel. Detta medför att de kan fastna i för tidiga steg i siktningsprocessen på grund av sin platta form. De klassas då som en grövre partikel som antas ha större massa än de egentligen har. Dessa glimmer partiklar kan därför lätt sugas med i luftflödet och ge utslag på mätvärden för grövre fraktioner.

5.4 Konstruktion och tillverknings aspekter

Från testerna erhöles ett bra perspektiv över hur vindsikten fungerade samt vad som borde gjorts annorlunda för ett bättre resultat. Under tester upptäcktes ett läckage vid inloppskanalen för luft till trumman. Detta var sämre ur ett tillverkningsmässigt perspektiv då systemet inte höll tätt, men i och med läckaget upptäcktes ett flöde av fina partiklar genom fläkten. Eftersom fina partiklar cirkulerar genom systemet bör lådan göras större. En större genomloppsarea i lådan medför en lägre lufthastighet. Lyftkraften på de finare partiklarna blir lägre och risken att de följer med luftflödet minskas.

För att undvika att mindre partiklar cirkulerar i systemet kunde lådan varit utrustad med galler eller något liknande som stör luftflödet i dess flödes riktning då det passerar genom "lådan". Störningar kan ge upphov till turbulens som medför att lyftkraften på de fina partiklarna minskar avsevärt och faller till botten.

Tillverkningsmässigt var vindsikten utformad på ett sådant vis att just där läckage inträffade var åtkomligheten låg. Detta innebar att läckaget var svårt att täta och problemet kvarstod genom alla tester.

För att underlätta analysering av funktionen kunde exempelvis vindsikten varit utrustad för att kunna se in maskinen exempelvis med någon typ av fönster.

5.5 Tid och väder

På grund av bristfällig planering och väderlek hann inte utförligare tester utföras. Brist på material gjorde att testerna blev fördröjda och planeringen hade inte rum för förseningar. Det material som fanns tillgängligt förbrukades under tester, men var alldeles för lite för att göra tester under en längre tid. Det fanns inte heller tillräckligt med material för att repetera testerna och kontrollera om resultatet var fluktuerande eller stabila.

När mer material skulle anskaffas på ett stenbrott, kördes fel partikelstorlekar i krossarna och övrigt material var vått. Om materialet är fuktigt eller om det är en hög luftfuktighet fungerar inte vindsiktstekniken. Detta beror på att vattnet binder ihop partiklarna med varandra. Massorna blir således högre och enskilda partiklar går ej att urskilja. Luftflödet klarar då inte att lyfta de fina partiklarna och allt faller ned i den grova produkten.

Det våta materialet torkades, men väderleken ändrades aldrig så pass mycket att nya tester kunde köras.

6 Slutsats

6.1 Svårstyrd fungerande prototyp

Vid testning av vindsiktprototypen erhöles ett önskvärt resultat. De andelen fina partiklar minskade avsevärt från inmatningssanden till slutproduktsanden. Resultaten är goda i avseende till den låga andelen fina partiklar som slutprodukten innehåller. Mindre bra är lutningen på effektivitetskurvan kring skärningspunkten. Lutningen är inte så skarp man kunde önska. Utöver att de finaste partiklarna klasserades bort, försvann även delar av de fraktioner strax över 0.063 mm i diameter. Optimalt vore att alla partiklar i fraktionen under 0.063 mm klasserades bort, medan alla fraktioner över 0.063 mm behölls. Detta är inte praktiskt möjligt, men ju skarpar effektivitetskurva desto bättre.

Hur väl konceptet fungerade är svårt att konstatera, då sambandanden mellan fläktstyrka och skärningspunkt är mycket oklara. Det visade sig redan vid beräkningar och simuleringar av prototypen att systemet är komplext. Kombinationen mellan vertikal och roterande hastighet, samtidigt som turbulens kan finnas gör att teoretiska tillämpningar är svåra att applicera.

I dagsläget är samband mellan skärningspunkt, vertikalt luftflöde och fläktstyrka okända, men resultaten från genomföra tester har visat sig vara goda.

6.2 Innovativ utformning

Vindsikten är konstruerad i en smart och innovativ utformning. Jämfört med dagens vindsiktar som använder sig av internt luftflöde är denna prototyp mindre komplext konstruerad och teoretiskt sett mindre utsatt för slitage. Vindsikten har låg komplexitet, då dess ingående delar är sammanlänkade genom enkla gränssnitt. Det skall teoretiskt sett inte passera några fina partiklar genom luftflödeskällan. Slitaget på vindsikten anses därför mindre jämfört med befintliga vindsiktar som har ett internt luftflöde.

6.3 Reducera fina partiklar som cirkulerar i systemet

Att finare partiklar cirkulerade genom hela systemet skyntades under testning av prototypen. Det har konstaterats att det behövs ett större utrymme mellan fläkt och utloppsrör. Alternativt kan luftflödet tvingas passera en skarp bana för att skapa en störning i luftflödet. På så sätt skulle en cirkulerande effekten av finare partiklar kunna undvikas vid vidareutveckling eller ombyggnation av prototyp.

6.4 Utföra fler och mer utförliga tester

Trummans smala diameter kan mycket väl gett upphov till turbulens för de högre lufthastigheterna. Tester bör utföras för att se om turbulens stör luftflödet i prototypen. Ytterligare tester bör även utföras för att verifiera att resultatet är stabilt, samt urskilja ett samband mellan fläktstyrka och skärningspunkt.

I dagsläget är det oklart om prototypen är värd att tillverka i en större skala, men fler tester bör kunna ge ett grundligt underlag till denna frågeställning. Tester borde utföras på flera olika massflöden av sand vid olika lufthastigheter. Före tester borde lufthastigheter vid de olika tyristorlägena dokumenterats med en flödesmätare.

6.5 Ytterligare rekommendation för tillverkning

Om konceptet ska tillverkas som ett demonstrationsobjekt kan det vara av intresse att kunna styra lutningen på luftinflödet till trumman. Detta kan göras med ett spjäll. Luftflödet kan då riktas uppåt i trumman med olika vinklar och tillsammans med den varierbara fläkten hitta bästa möjliga inställning.

På den nedre konan i trumsystemet fastnade sandmassor, vilken borde tillverkas med dögre lutning för att undvika stopp.

Källförteckning

- 1 Johansson. R. Dry Classification of Fine Aggregates for Concrete and Asphalt. Gothenburg: Chalmers University of Technology; 2011.
- 2 Celik, T. och Marar K. *Effects of crushed stone dust on some properties of concrete*. Cement and concrete research, 1996. 26(7); p. 1121-1130.
- 3 White. FM. Fluid Mechanics. 7th ed. In SI Units. New York: McGraw-Hill; 2011
- 4 Lindstedt. P. & Burenus. J. The Value Model. How to Master Product Development and Create Unrivalled Customer Value. Sweden: Nimba; 2006.
- 5 Sturtevant Inc. Whirlwind air classifier. 2009 [hämtat 2012-02-13]. Tillgänglig: <http://www.sturtevantinc.com/whirlwind.php>
- 6 Metso. Metso Air Classifiers. [hämtat 2012-02-014]. Tillgänglig: <http://www.metso.com/>
- 7 Wikipedia. Cyklonrening. [hämtat 2012-03-02]. <http://sv.wikipedia.org/wiki/Cyklonrening>
- 8 Sjöström. E. Rökgasrening. Stoftrening så funkar det. 2003 [hämtat 2012-03-02]. Tillgänglig: <http://www.novator.se/bioenergy/BE0304/s19.pdf>

Appendix

I. Appendix 1 - Morfologisk matris

Morfologisk matris för *Koncept 1*

| Delfunktioner | Dellösningar | | | | | | |
|--|--|---|---|---|--|--|---|
| Inflöde och portionering av maskinsand | Matarskruv underifrån | Matarskruv från sidan | Gravitation/nedsläpp ovanifrån med roterande luckor. | Löpande band | Hiss | Gravitation, rörets dimension styr flödesmängden | Gravitation med vertikalt stegande hjul. Släpper ut små portioner |
| Fördelning av partiklar inne i vindsikten | Spridningsgaller stillastående | Spridningsgaller roterande | Släpps över vertikalt luftflöde | Slunga. Roterande slev som sprider ut portioner | Roterande kona utan spjäll | Stillastående kona | |
| Skapa luftflöde | Axialfläkt underifrån. Inga partiklar igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar sugas igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar avskiljs innan fläkt | Fläkt gjord av utbytbara plåtar. Lätt utbytbar. Partiklar färdas igenom. | Kombination av flera fläktar | Fläkt från sidan | Två fläktar från sidan |
| Centrifugalkraftsgenerering | Fläkt med designade rotorblad som genererar ett roterande luftflöde | Placering av galler som lutar i luftflödets riktning och tvingar luften i en roterande bana | Geometrisk utformning av "turbinväggar" | Slunga ut sandpartiklarna | Kombination av designade rotorblad och returnvanes | Placering av fläkt | |
| Klassering av fina och grova partiklar | Finare partiklar sugas uppåt, grova faller ned åt pga deras tyngdkraft | Den horisontella hastigheten på partiklarna får grövre partiklar att åka ut till kanten snabbare än de fina, de faller ned på sidorna och fines åker upp i mitten | | | | | |
| Separering av fina partiklar från det interna luftflödets bana | Turbulens orsakas vid snabba geometriändringar | Areaskillnad gör att partiklarna tappar hastighet och faller ner | Filter | En svängd bana som transporterar både fina partiklar och luft. Fina partiklar trycks ut pga centrifugalkraft. Luften följer annan bana. | Kombination av turbulens och areaskillnad | | |
| Utflöden av partikelansamlingar, dvs transporten | Gravitationskraften | Matarskruv ut, Reglerar så att ingen luft sugas in. | Lock eller spjäll, som förhindrar att luft sugas igenom. Öppnas då en viss mängd är nådd. | | | | |
| Möjliggöra mätningar av luftflöden | Instickmöjlighet av Prandtlrör | | | | | | |

Morfologisk matris för *koncept 2*

| Delfunktioner | Dellösningar | | | | | | |
|--|--|---|---|---|--|--|---|
| Inflöde och portionering av maskinsand | Matarskruv underifrån | Matarskruv från sidan | Gravitation/nedsilpp överifrån med roterande luckor. | Löpande band | Hiss | Gravitation, rörets dimension styr flödesmängden | Gravitation med vertikalt stegande hjul. Släpper ut små portioner |
| Fördelning av partiklar inne i vindsikten | Spridningsgaller stillastående | Spridningsgaller roterande | Släpps över vertikalt luftflöde | Slunga. Roterande slev som sprider ut portioner | Roterande kona utan spjäll | Stillastående kona | |
| Skapa luftflöde | Axialfläkt underifrån. Inga partiklar igenom | Axialfläkt överifrån. Fina partiklar sugas igenom | Axialfläkt överifrån. Fina partiklar avskiljs innan fläkt | Fläkt gjord av utbytbara plåtar. Lätt utbytbar. Partiklar färdas igenom. | Kombination av flera fläktar | Fläkt från sidan | Två fläktar från sidan |
| Centrifugalkrafts-generering | Fläkt med designade rotorblad som genererar ett roterande luftflöde | Placering av galler som lutar i luftflödets riktning och tvingar luften i en roterande bana | Geometrisk utformning av "turbinväggar" | Slunga ut sandpartiklarna | Kombination av designade rotorblad och returnvanes | Placering av fläkt | |
| Klassering av fina och grova partiklar | Finare partiklar sugas uppåt, grova faller ned åt pga deras tyngdkraft | Den horisontella hastigheten på partiklarna får grövre partiklar att åka ut till kanten snabbare än de fina, de faller ned på sidorna och fines åker upp i mitten | | | | | |
| Separering av fina partiklar från det interna luftflödets bana | Turbulens orsakas vid snabba geometriändringar | Areaskillnad gör att partiklarna tappar hastighet och faller ner | Filter | En svängd bana som transporterar både fina partiklar och luft. Fina partiklar trycks ut pga centrifugalkraft. Luften följer annan bana. | Kombination av turbulens och areaskillnad | | |
| Utfloden av partikelansamlingar, dvs transporten | Gravitationskraften | Matarskruv ut, Reglerar så att ingen luft sugas in. | Lock eller spjäll, som förhindrar att luft sugas igenom. Öppnas då en viss mängd är nådd. | | | | |
| Möjliggöra mätningar av luftflöden | Instickmöjlighet av Prandtlrör | | | | | | |

Morfologisk matris för *koncept 3.1*

| Delfunktioner | Dellösningar | | | | | | |
|--|--|---|---|---|--|--|---|
| Inflöde och portionering av maskinsand | Matarskruv underifrån | Matarskruv från sidan | Gravitation/nedsläpp ovanifrån med roterande luckor. | Löpande band | Hiss | Gravitation, rörets dimension styr flödesmängden | Gravitation med vertikalt stegande hjul. Släpper ut små portioner |
| Fördelning av partiklar inne i vindsikten | Spridningsgaller stillastående | Spridningsgaller roterande | Släpps över vertikalt luftflöde | Slunga. Roterande slev som sprider ut portioner | Roterande kona utan spjäll | Stillastående kona | |
| Skapa luftflöde | Axialfläkt underifrån. Inga partiklar igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar sugas igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar avskiljs innan fläkt | Fläkt gjord av utbytbara plåtar. Lätt utbytbar. Partiklar färdas igenom. | Kombination av flera fläktar | Fläkt från sidan | Två fläktar från sidan |
| Centrifugalkraftsgenerering | Fläkt med designade rotorblad som genererar ett roterande luftflöde | Placering av galler som lutar i luftflödets riktning och tvingar luften i en roterande bana | Geometrisk utformning av "turbinväggar" | Slunga ut sandpartiklarna | Kombination av designade rotorblad och returnvanes | Placering av fläkt | |
| Klassering av fina och grova partiklar | Finare partiklar sugas uppåt, grova faller ned åt pga deras tyngdkraft | Den horisontella hastigheten på partiklarna får grövre partiklar att åka ut till kanten snabbare än de fina, de faller ned på sidorna och fines åker upp i mitten | | | | | |
| Separering av fina partiklar från det interna luftflödets bana | Turbulens orsakas vid snabba geometriändringar | Areaskillnad gör att partiklarna tappar hastighet och faller ner | Filter | En svängd bana som transporterar både fina partiklar och luft. Fina partiklar trycks ut pga centrifugalkraft. Luften följer annan bana. | Kombination av turbulens och areaskillnad | | |
| Utfloden av partikelansamlingar, dvs transporten | Gravitationskraften | Matarskruv ut, Reglerar så att ingen luft sugas in. | Lock eller spjäll, som förhindrar att luft sugas igenom. Öppnas då en viss mängd är nådd. | | | | |
| Möjliggöra mätningar av luftflöden | Instickmöjlighet av Prandtrör | | | | | | |

Morfologisk matris för *koncept 3.2*

| Delfunktioner | Dellösningar | | | | | | |
|--|--|---|---|---|--|--|---|
| Inflöde och portionering av maskinsand | Matarskruv underifrån | Matarskruv från sidan | Gravitation/nedsläpp ovanifrån med roterande luckor. | Löpande band | Hiss | Gravitation, rörets dimension styr flödesmängden | Gravitation med vertikalt stegande hjul. Släpper ut små portioner |
| Fördelning av partiklar inne i vindsikten | Spridningsgaller stillastående | Spridningsgaller roterande | Släpps över vertikalt luftflöde | Slunga. Roterande slev som sprider ut portioner | Roterande kona utan spjäll | Stillastående kona | |
| Skapa luftflöde | Axialfläkt underifrån. Inga partiklar igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar sugas igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar avskiljs innan fläkt | Fläkt gjord av utbytbara plåtar. Lätt utbytbar. Partiklar färdas igenom. | Kombination av flera fläktar | Fläkt från sidan | Två fläktar från sidan |
| Centrifugalkraftsgenerering | Fläkt med designade rotorblad som genererar ett roterande luftflöde | Placering av galler som lutar i luftflödets riktning och tvingar luften i en roterande bana | Geometrisk utformning av "turbinväggar" | Slunga ut sandpartiklarna | Kombination av designade rotorblad och returnvanes | Placering av fläkt | |
| Klassering av fina och grova partiklar | Finare partiklar sugas uppåt, grova faller ned åt pga deras tyngdkraft | Den horisontella hastigheten på partiklarna får grövre partiklar att åka ut till kanten snabbare än de fina, de faller ned på sidorna och fines åker upp i mitten | | | | | |
| Separering av fina partiklar från det interna luftflödets bana | Turbulens orsakas vid snabba geometriändringar | Areaskillnad gör att partiklarna tappar hastighet och faller ner | Filter | En svängd bana som transporterar både fina partiklar och luft. Fina partiklar trycks ut pga centrifugalkraft. Luften följer annan bana. | Kombination av turbulens och areaskillnad | | |
| Utfloden av partikelansamlingar, dvs transporten | Gravitationskraften | Matarskruv ut, Reglerar så att ingen luft sugas in. | Lock eller spjäll, som förhindrar att luft sugas igenom. Öppnas då en viss mängd är nådd. | | | | |
| Möjliggöra mätningar av luftflöden | Instickmöjlighet av Prandtlrör | | | | | | |

Morfologisk matris för *koncept 4.1*

| Delfunktioner | Dellösningar | | | | | | |
|---|--|---|---|---|--|--|---|
| Inflöde och portionering av maskinsand | Matarskruv underifrån | Matarskruv från sidan | Gravitation/nedsläpp ovanifrån med roterande luckor. | Löpande band | Hiss | Gravitation, rörets dimension styr flödesmängden | Gravitation med vertikalt stegande hjul. Släpper ut små portioner |
| Fördelning av partiklar inne i vindsikten | Spridningsgaller stillastående | Spridningsgaller roterande | Släpps över vertikalt luftflöde | Slunga. Rotera slev som sprider ut portioner | Rotera kona utan spjäll | Stillastående kona | |
| Skapa luftflöde | Axialfläkt underifrån. Inga partiklar igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar sugas igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar avskiljs innan fläkt | Fläkt gjord av utbytbara plåtar. Lätt utbytbar. Partiklar färdas igenom. | Kombination av flera fläktar | Fläkt från sidan | Två fläktar från sidan |
| Centrifugalkrafts-generering | Fläkt med designade rotorblad som genererar ett roterande luftflöde | Placering av galler som lutar i luftflödets riktning och tvingar luften i en roterande bana | Geometrisk utformning av "turbinväggar" | Slunga ut sandpartiklarna | Kombination av designade rotorblad och returnvanes | Placering av fläkt | |
| Klassering av fina och grova partiklar | Finare partiklar sugas uppåt, grova faller ned åt pga deras tyngdkraft | Den horisontella hastigheten på partiklarna får grövre partiklar att åka ut till kanten snabbare än de fina, de faller ned på sidorna och fines åker upp i mitten | | | | | |
| Separering av fina partiklar från det interna luftflödets bana | Turbulens orsakas vid snabba geometriändringar | Areaskillnad gör att partiklarna tappar hastighet och faller ner | Filter | En svängd bana som transporterar både fina partiklar och luft. Fina partiklar trycks ut pga centrifugalkraft. Luften följer annan bana. | Kombination av turbulens och areaskillnad | | |
| Utfloden av partikelansamlingar, dvs transporten | Gravitationskraften | Matarskruv ut, Reglerar så att ingen luft sugas in. | Lock eller spjäll, som förhindrar att luft sugas igenom. Öppnas då en viss mängd är nådd. | | | | |
| Möjliggöra mätningar av luftflöden | Instickmöjlighet av Prandtlrör | | | | | | |

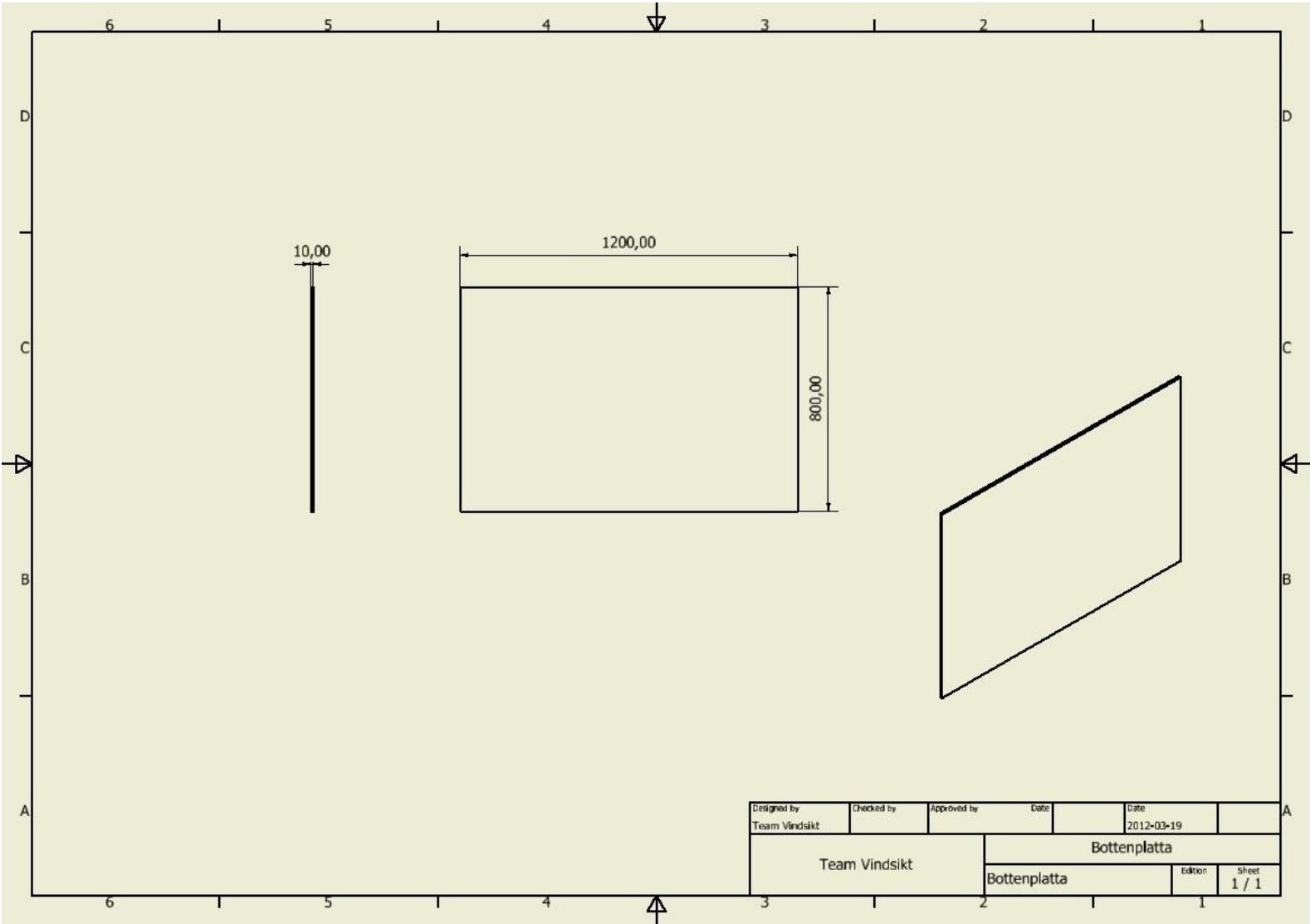
Morfologisk matris för *Koncept 4.2*

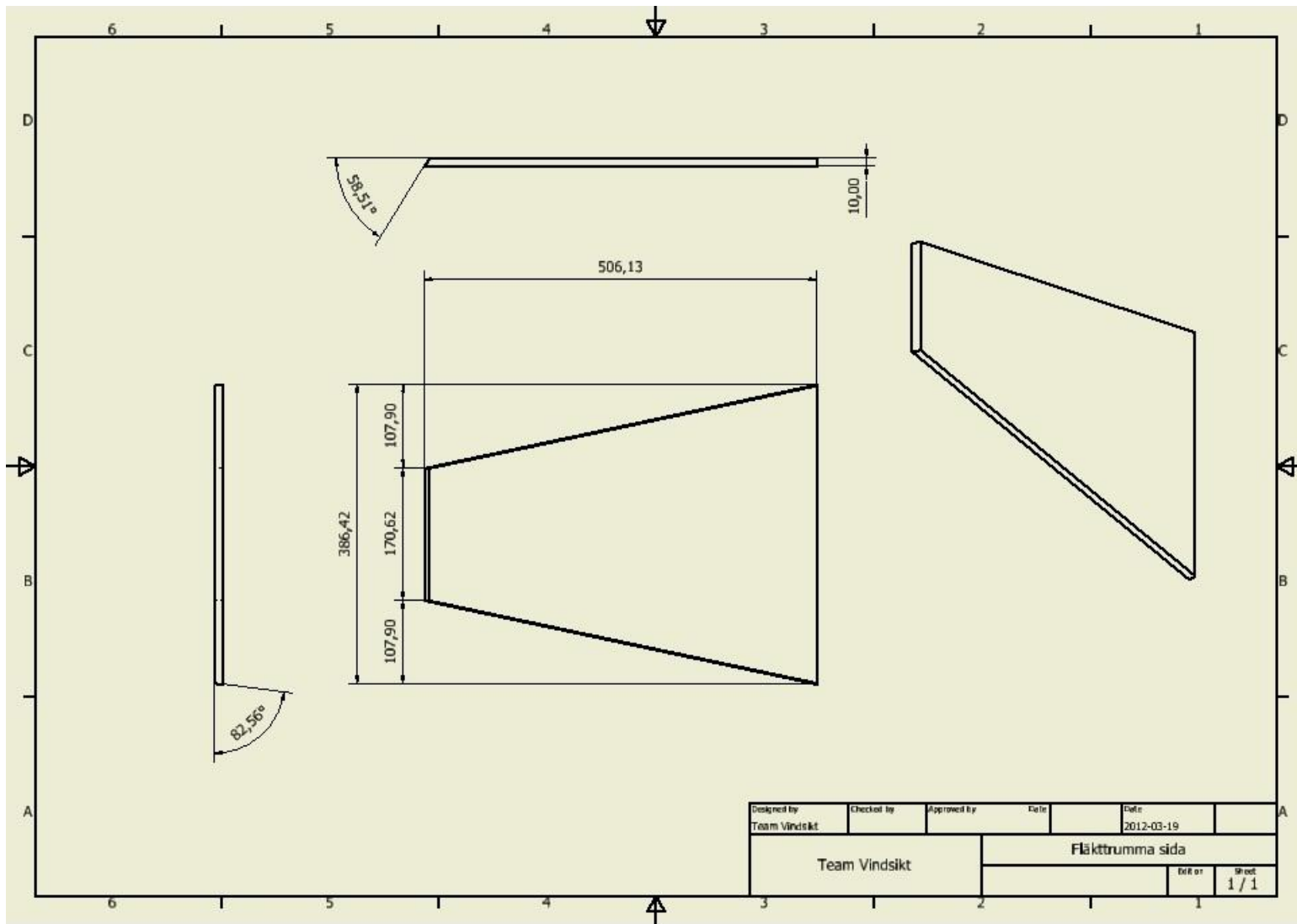
| Delfunktioner | Dellösningar | | | | | | |
|--|---|---|--|---|--|---|---|
| Inflöde och portionering av maskinsand | Matarskruv underifrån | Matarskruv från sidan | Gravitation/nedsläpp ovanifrån med roterande luckor. | Löpande band | Hiss | Gravitation, rörelsdimension styr flödesmängden | Gravitation med vertikalt stegande hjul. Släpper ut små portioner |
| Fördelning av partiklar inne i vindsikten | Spridningsgaller stillastående | Spridningsgaller roterande | Släpps över vertikalt luftflöde | Slunga. Roterande slev som sprider ut portioner | Roterande kona utan spjäll | Stillastående kona | |
| Skapa luftflöde | Axialfläkt underifrån. Inga partiklar igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar sugsgenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar avskiljs innan fläkt | Fläkt gjord av utbytbara plåtar. Lätt utbytbar. Partiklar färdas igenom. | Kombination av flera fläktar | Fläkt från sidan | Två fläktar från sidan |
| Centrifugalkraftsgenerering | Fläkt med designade rotorblad som genererar ett roterande luftflöde | Placering av galler som lutar i luftflödets riktning och tvingar luften i en roterande bana | Geometrisk utformning av "turbinväggar" | Slunga ut sandpartiklarna | Kombination av designade rotorblad och returnvanes | Placering av fläkt | |
| Klassering av fina och grova partiklar | Finare partiklar sugsguppåt, grova faller ned åt pga deras tyngdkraft | Den horisontella hastigheten på partiklarna får grövre partiklar att åka ut till kanten snabbare än de fina, de faller ned på sidorna och fines åker upp i mitten | | | | | |
| Separering av fina partiklar från det interna luftflödets bana | Turbulens orsakas vid snabba geometriändringar | Areaskillnad gör att partiklarna tappar hastighet och faller ner | Filter | En svängd bana som transporterar både fina partiklar och luft. Fina partiklar trycks ut pga centrifugalkraft. Luften följer annan bana. | Kombination av turbulens och areaskillnad | | |
| Utfloden av partikelansamlingar, dvs transporten | Gravitationskraften | Matarskruv ut, Reglerar så att ingen luft sugsgin. | Lock eller spjäll, som förhindrar att luft sugsgigenom. Öppnas då en viss mängd är nådd. | | | | |
| Möjliggöra mätningar av luftflöden | Instickmöjlighet av Prandtlrör | | | | | | |

Morfologisk matris för *koncept 5*

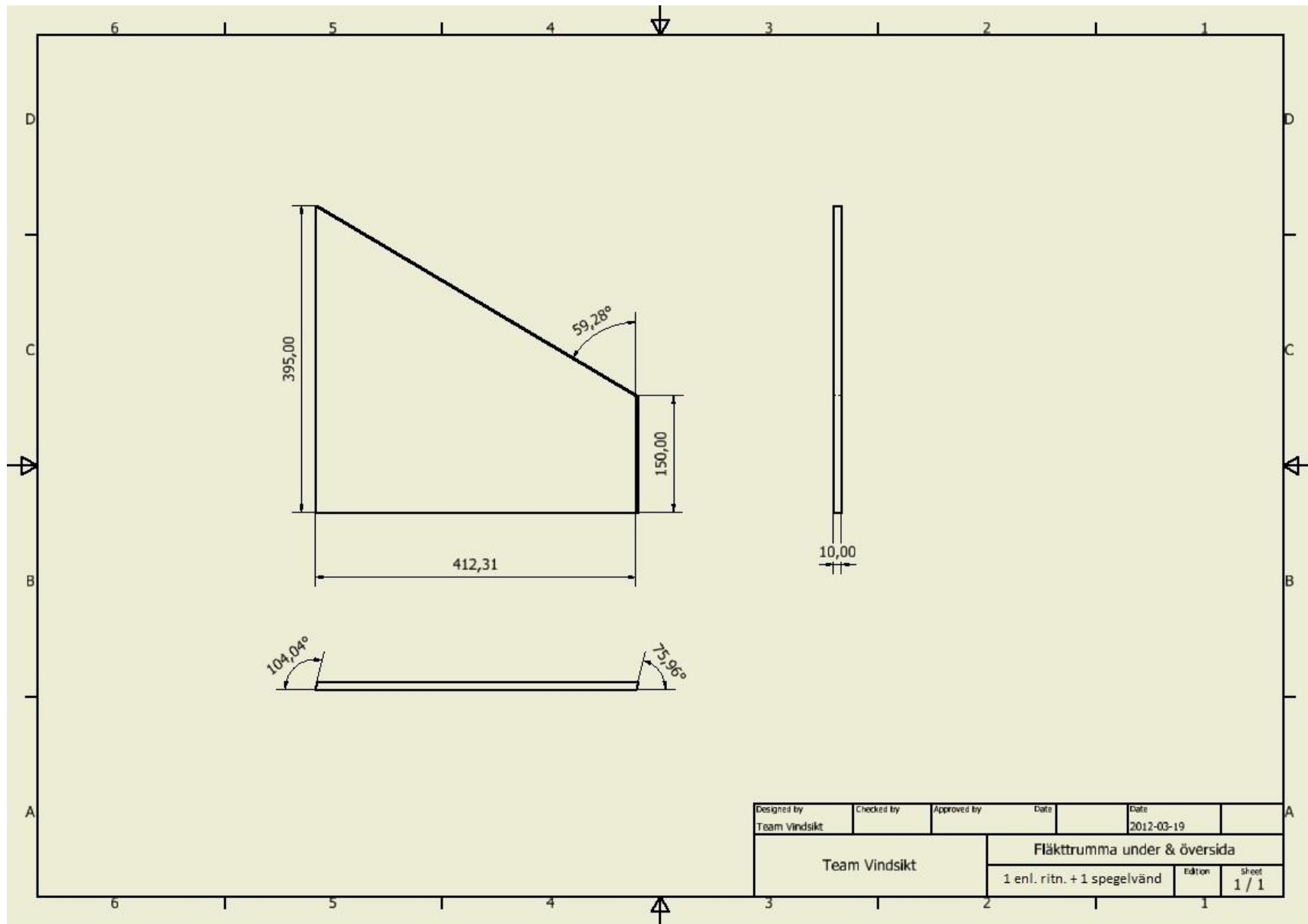
| Delfunktioner | Dellösningar | | | | | | |
|--|--|---|---|---|--|--|---|
| Inflöde och portionering av maskinsand | Matarskruv underifrån | Matarskruv från sidan | Gravitation/neds/ äpp ovanifrån med roterande luckor. | Löpande band | Hiss | Gravitation, rörets dimension styr flödesmängden | Gravitation med vertikalt stegande hjul. Släpper ut små portioner |
| Fördelning av partiklar inne i vindsikten | Spridningsgaller stillastående | Spridningsgaller roterande | Släpps över vertikalt luftflöde | Slunga. Roterande slev som sprider ut portioner | Roterande kona utan spjäll | Stillastående kona | |
| Skapa luftflöde | Axialfläkt underifrån. Inga partiklar igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar sugts igenom | Axialfläkt ovanifrån. Fina partiklar avskiljs innan fläkt | Fläkt gjord av utbytbara plåtar. Lätt utbytbar. Partiklar färdas igenom. | Kombination av flera fläktar | Fläkt från sidan | Två fläktar från sidan |
| Centrifugalkrafts-generering | Fläkt med designade rotorblad som genererar ett roterande luftflöde | Placering av galler som lutar i luftflödets riktning och tvingar luften i en roterande bana | Geometrisk utformning av "turbinväggar" | Slunga ut sandpartiklarna | Kombination av designade rotorblad och returnvanes | Placering av fläkt | |
| Klassering av fina och grova partiklar | Finare partiklar sugts uppåt, grova faller ned åt pga deras tyngdkraft | Den horisontella hastigheten på partiklarna får grövre partiklar att åka ut till kanten snabbare än de fina, de faller ned på sidorna och fines åker upp i mitten | | | | | |
| Separering av fina partiklar från det interna luftflödets bana | Turbulens orsakas vid snabba geometriändringar | Areaskillnad gör att partiklarna tappar hastighet och faller ner | Filter | En svängd bana som transporterar både fina partiklar och luft. Fina partiklar trycks ut pga centrifugalkraft. Luften följer annan bana. | Kombination av turbulens och areaskillnad | | |
| Utflöden av partikelansamlingar, dvs transporten | Gravitationskraften | Matarskruv ut, Reglerar så att ingen luft sugts in. | Lock eller spjäll, som förhindrar att luft sugts igenom. Öppnas då en viss mängd är nådd. | | | | |
| Möjliggöra mätningar av luftflöden | Instickmöjlighet av Prandtlrör | | | | | | |

II. Appendix 2 - Ritningar



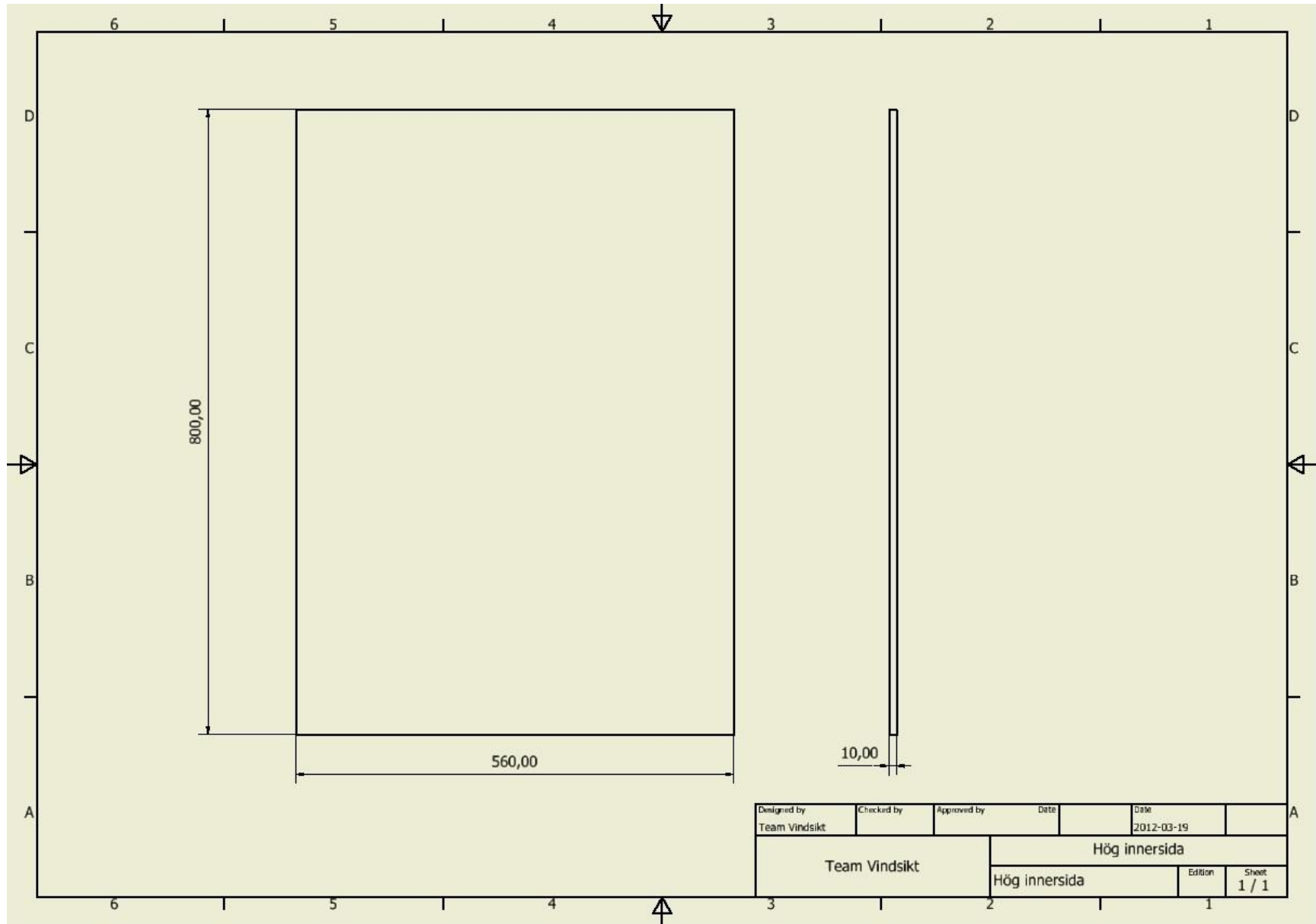


| | | | | | |
|---------------|------------|-------------|-----------------|------------|-------|
| Designed by | Checked by | Approved by | Date | Date | |
| Team Vindsikt | | | | 2012-03-19 | |
| Team Vindsikt | | | Fläktrumma sida | | |
| | | | | File nr | Sheet |
| | | | | | 1 / 1 |



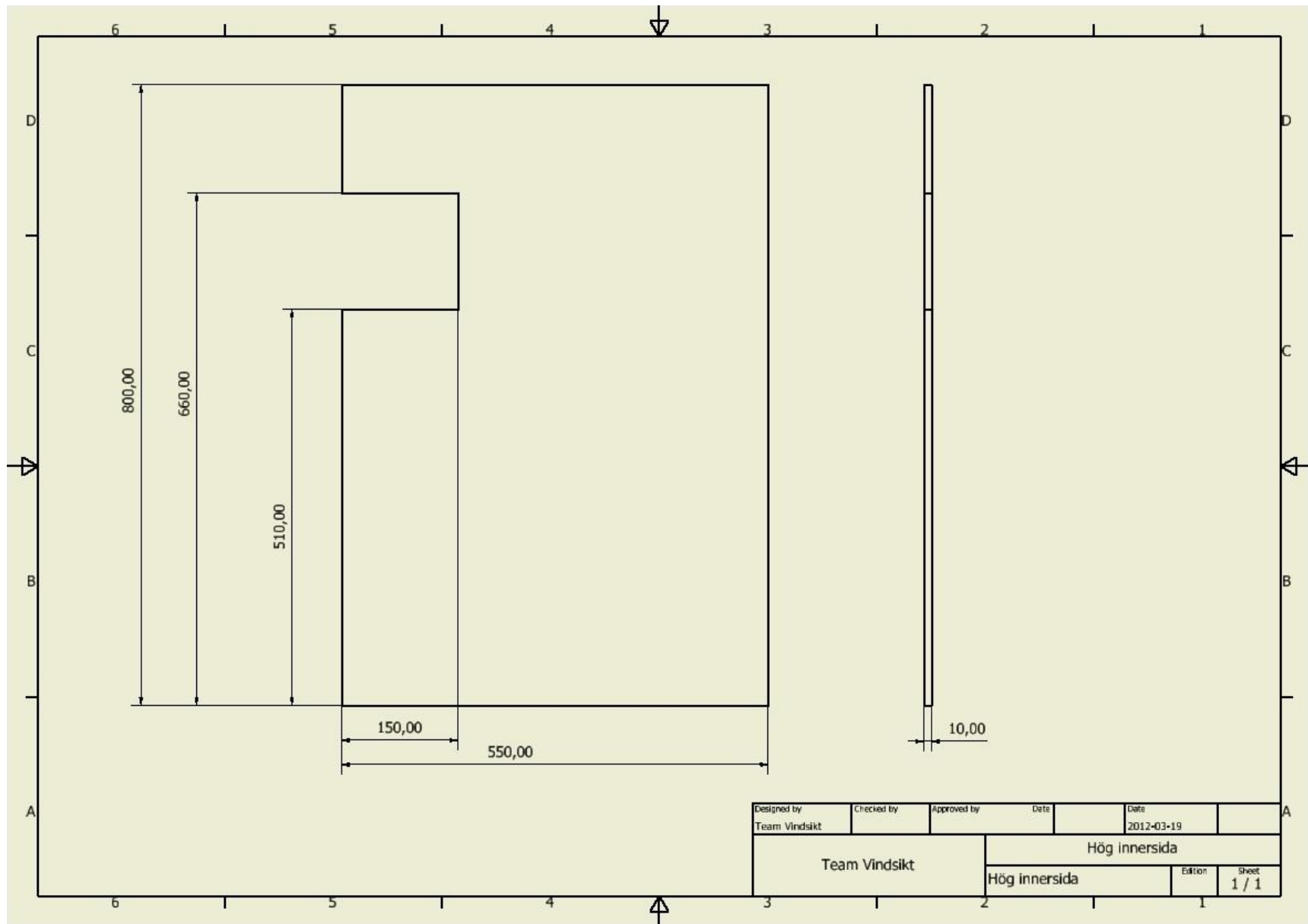
| | | | | | |
|------------------------------|------------|-------------|------------------------------|--------------------|----------------|
| Designed by Team Vindsikt | Checked by | Approved by | Date | Date 2012-03-19 | |
| Team Vindsikt | | | Fläkttrumma under & översida | | |
| | | | 1 enl. ritn. + 1 spegelvänd | Edtion | Sheet 1 / 1 |

C

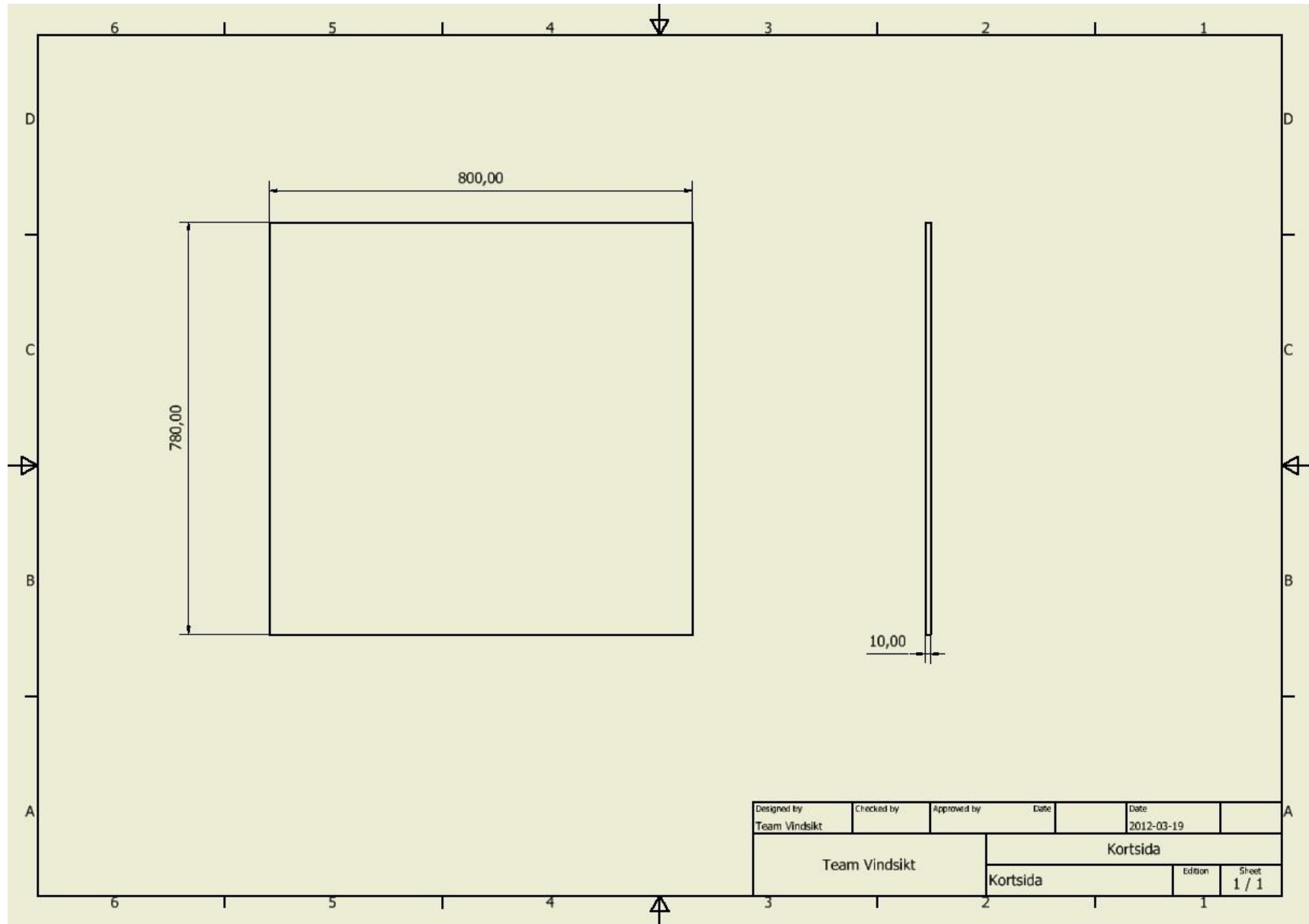


| | | | | |
|------------------------------|------------|---------------|--------------|--------------------|
| Designed by Team Vindsikt | Checked by | Approved by | Date | Date 2012-03-19 |
| Team Vindsikt | | Hög innersida | | |
| Hög innersida | | | Edition 1 | Sheet 1 / 1 |

D

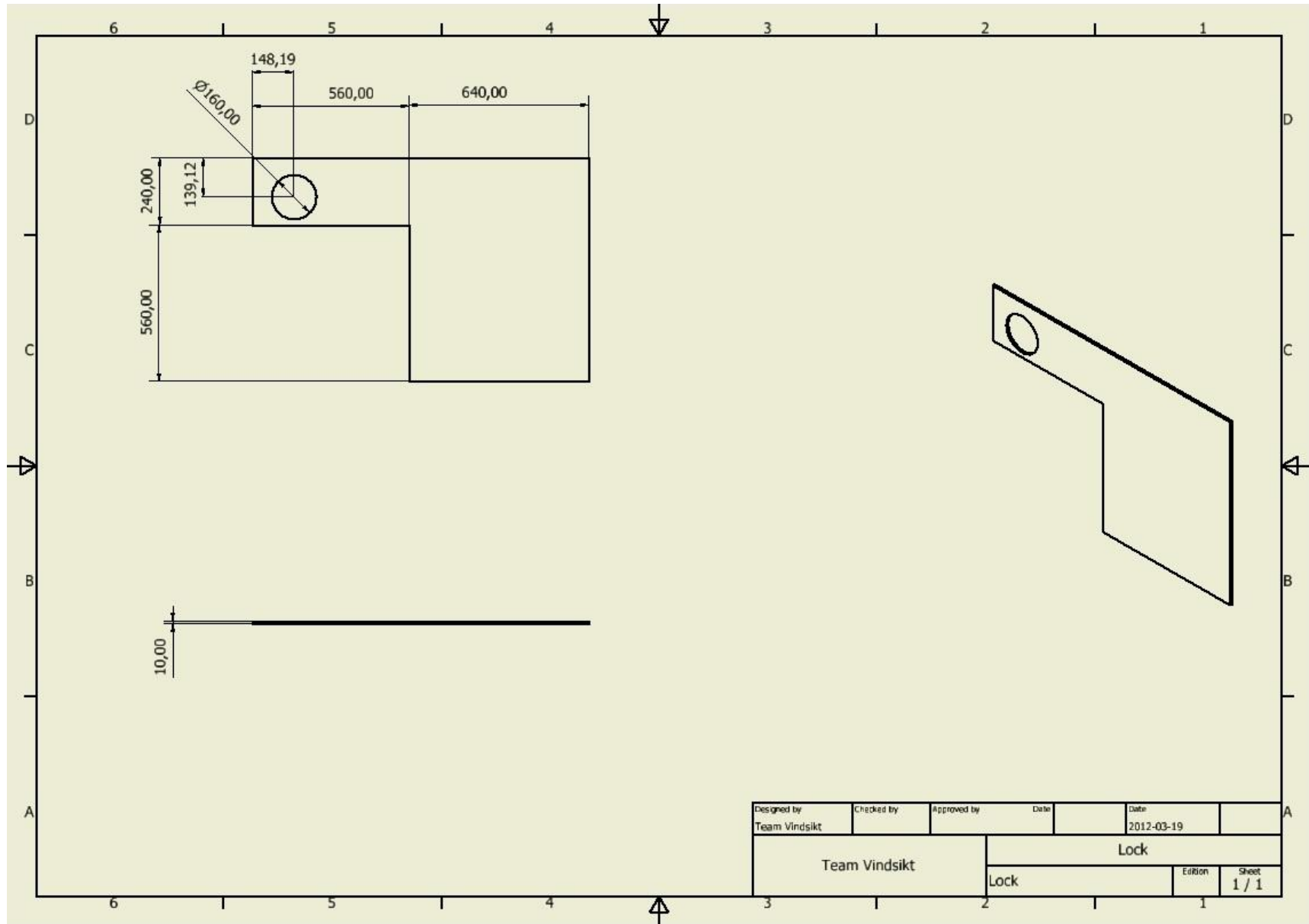


E



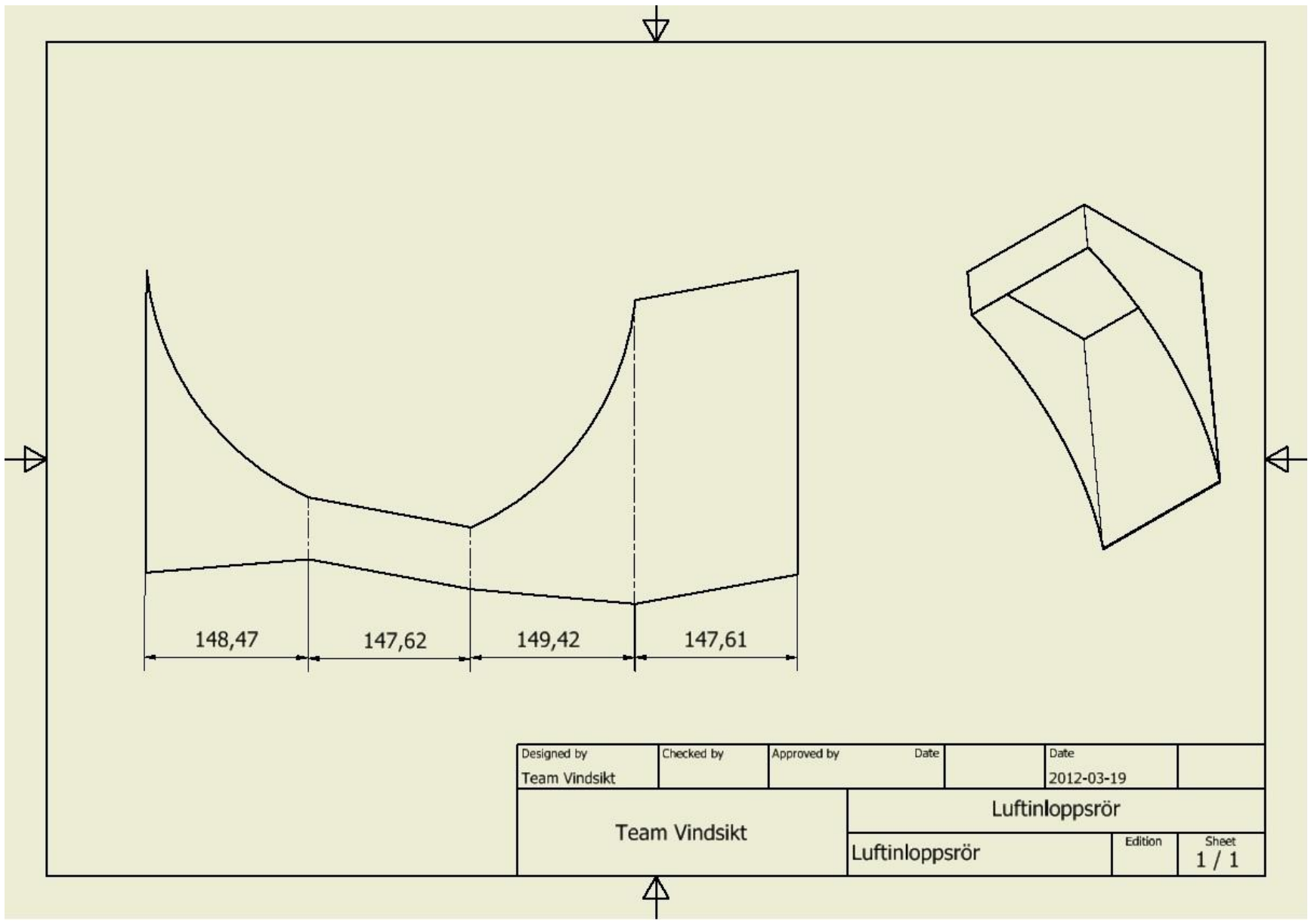
| | | | | |
|------------------------------|------------|-------------|--------------------|----------------|
| Designed by Team Vindsikt | Checked by | Approved by | Date 2012-03-19 | |
| Team Vindsikt | | Kortsida | | |
| | | Kortsida | Edition | Sheet 1 / 1 |

F



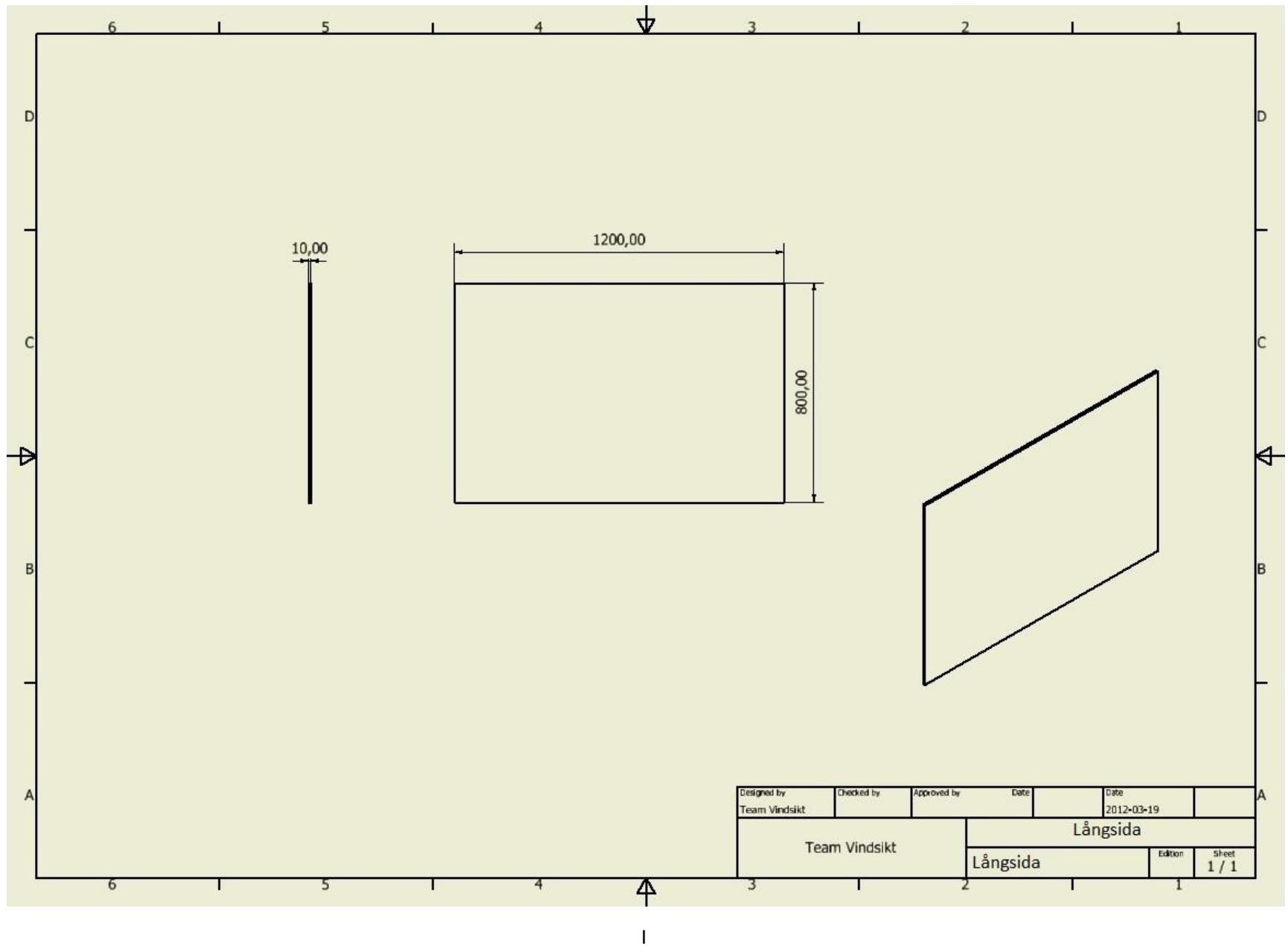
| | | | | | |
|------------------------------|------------|-------------|---------|--------------------|--|
| Designed by Team Vindsikt | Checked by | Approved by | Date | Date 2012-03-19 | |
| Team Vindsikt | | Lock | | | |
| | | Lock | Edition | Sheet 1 / 1 | |

G

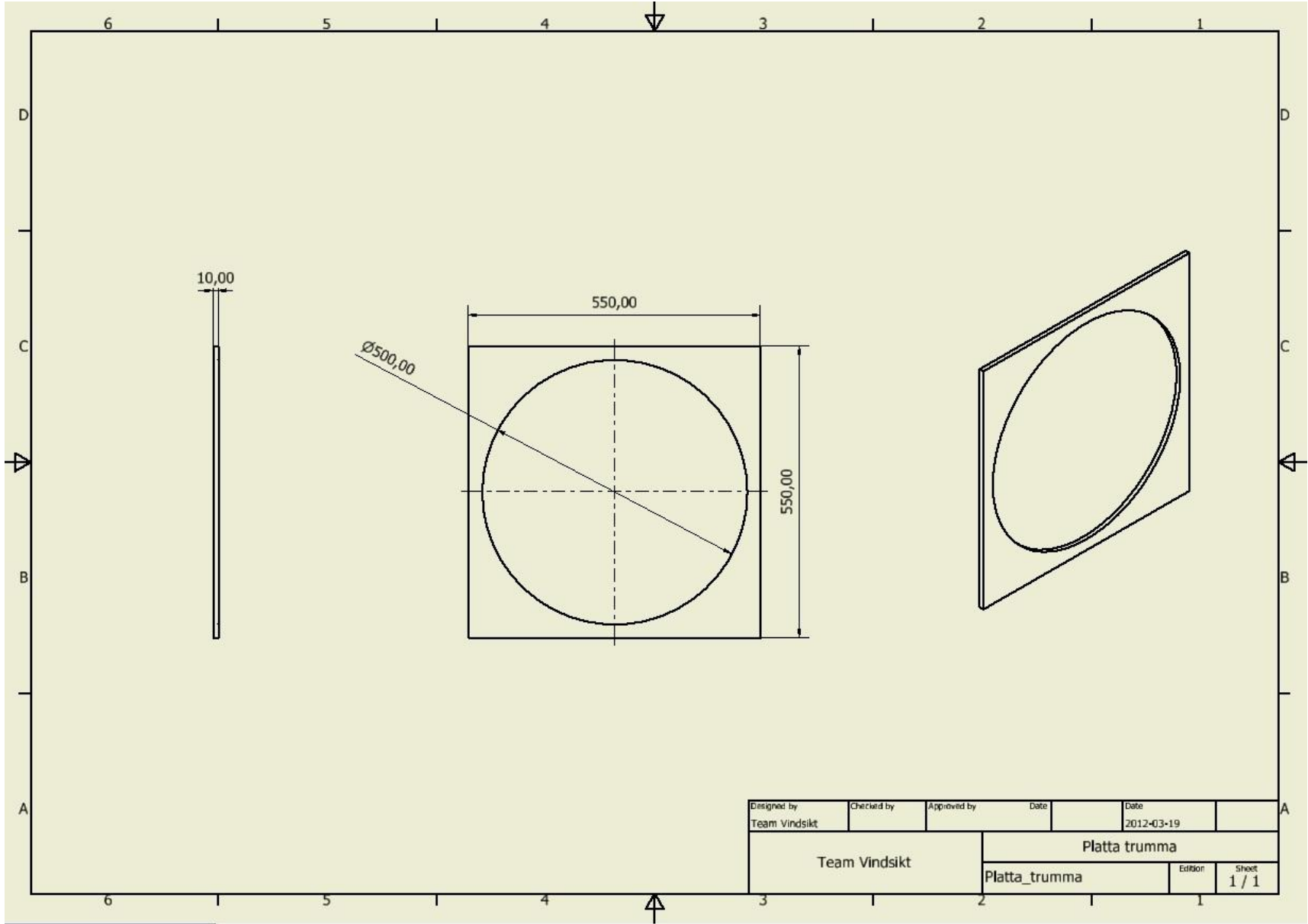


| | | | | | |
|---------------|------------|-------------|----------------|------------|-------|
| Designed by | Checked by | Approved by | Date | Date | |
| Team Vindsikt | | | | 2012-03-19 | |
| Team Vindsikt | | | Luftinloppsrör | | |
| | | | Luftinloppsrör | Edition | Sheet |
| | | | | | 1 / 1 |

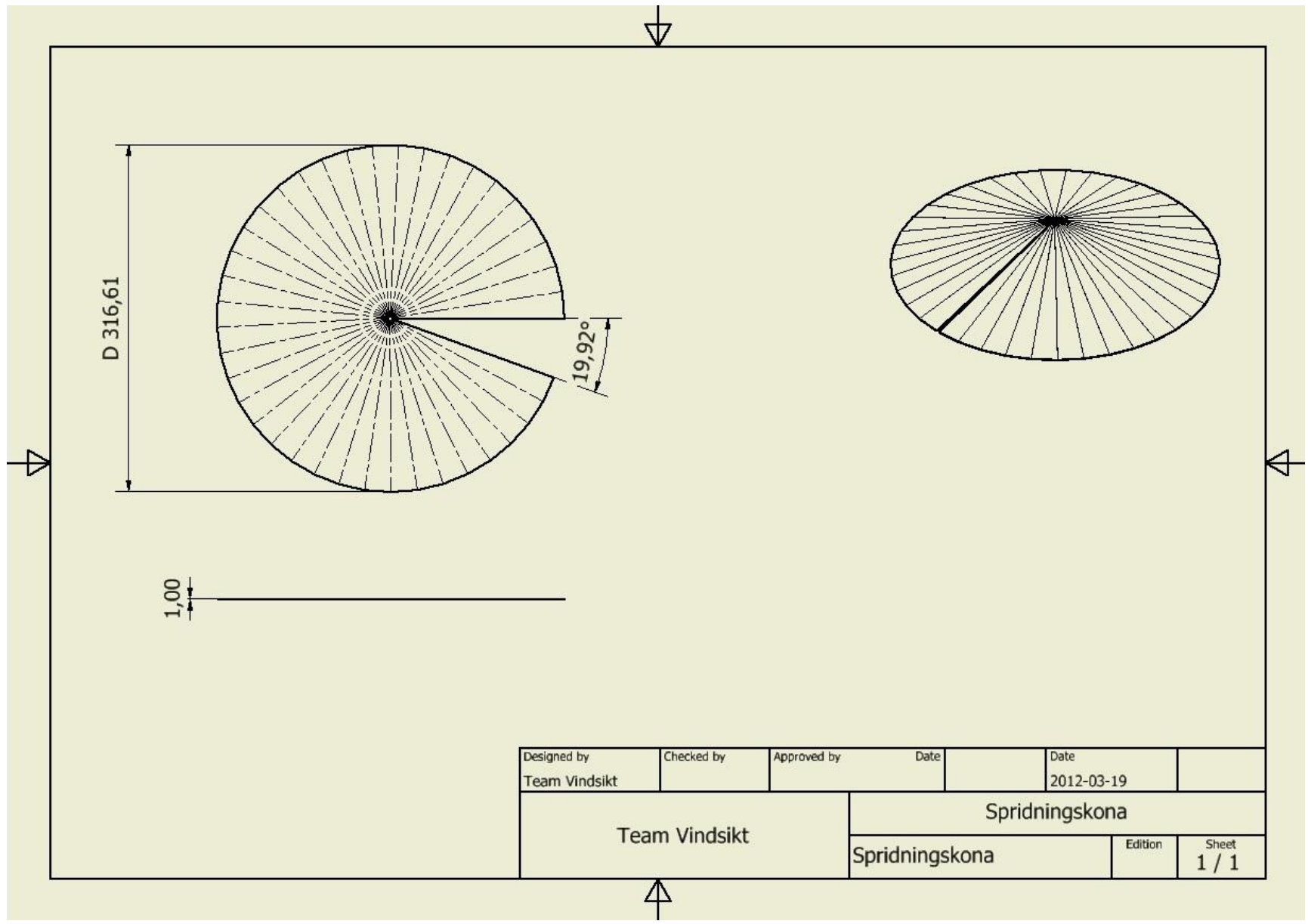
H



| | | | | | |
|------------------------------|------------|-------------|---------|--------------------|--|
| Designed by Team Vindsikt | Checked by | Approved by | Date | Date 2012-03-19 | |
| Team Vindsikt | | Långsida | | | |
| Långsida | | | Edition | Sheet 1 / 1 | |

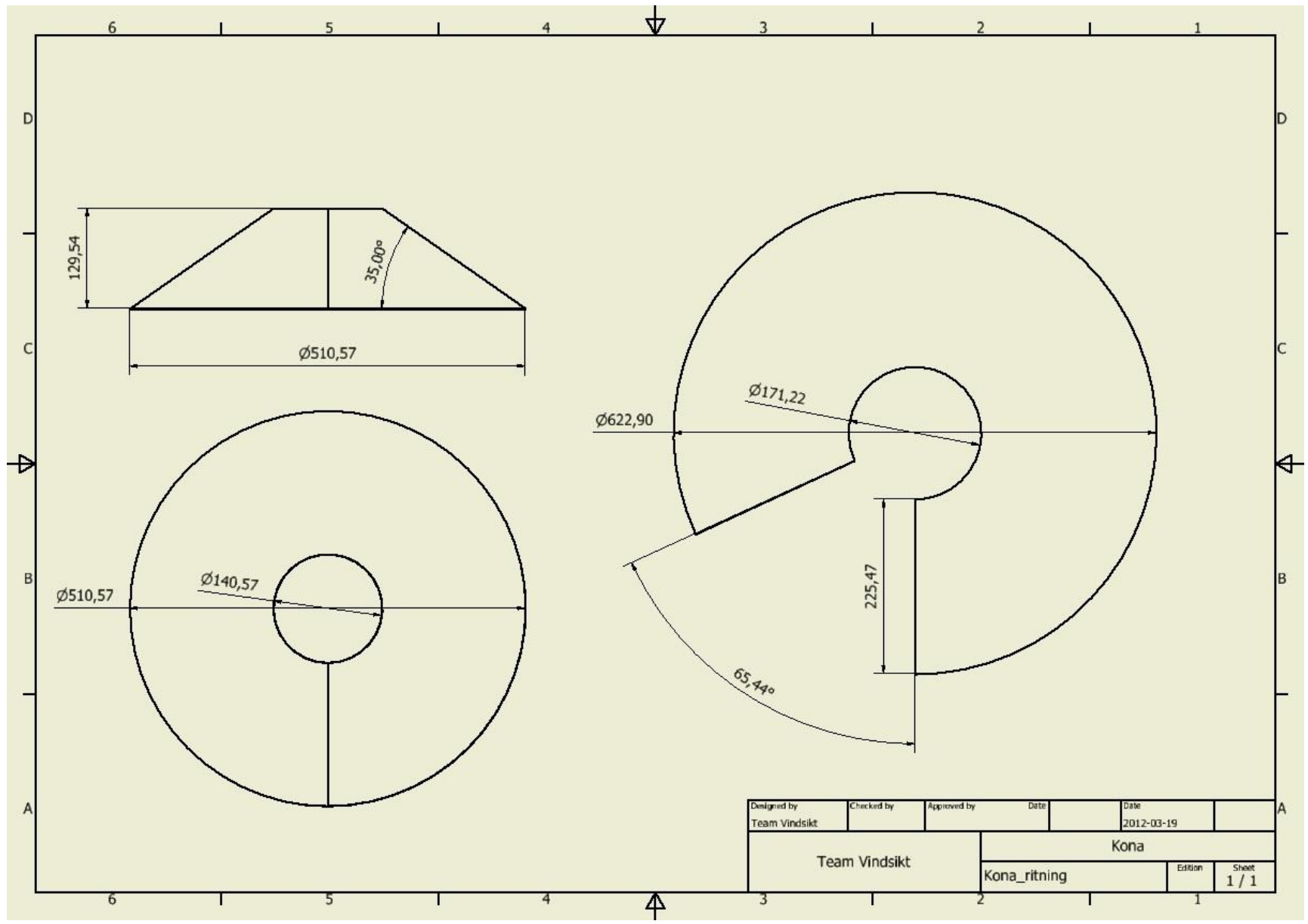


| | | | | | |
|------------------------------|------------|---------------|---------|--------------------|--|
| Designed by Team Vindsikt | Checked by | Approved by | Date | Date 2012-03-19 | |
| Team Vindsikt | | Platta trumma | | | |
| | | Platta_trumma | Edition | Sheet 1 / 1 | |



| | | | | |
|------------------------------|------------|----------------|---------|--------------------|
| Designed by Team Vindsikt | Checked by | Approved by | Date | Date 2012-03-19 |
| Team Vindsikt | | Spridningskona | | |
| | | Spridningskona | Edition | Sheet 1 / 1 |

K



| | | | | |
|---------------|------------|--------------|---------|------------|
| Designed by | Checked by | Approved by | Date | Date |
| Team Vindsikt | | | | 2012-03-19 |
| Team Vindsikt | | Kona | | |
| | | kona_ritning | Edition | Sheet |
| | | | | 1 / 1 |

L

