



CHALMERS

Frysseparation av slam och sediment: En studie av Effektivitet och Materialoptimering

EXAMENSARBETE INOM HÖGSKOLEINGENJÖRSPROGRAMMET
MASKINTEKNIK

Redir Hussein & Victor Johansson

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

www.chalmers.se

Tack brev

Vi vill rikta ett stort och varmt tack till vår examinator Maria Grahn för hennes stöd, vägledning och värdefulla synpunkter under arbetets gång. Hon har varit otroligt lätt att få tag på när frågor dykt upp och har alltid tagit sig tid att hjälpa oss vidare. Vi har haft en mycket god dialog genom hela processen och känt oss trygga och väl vägleda från start till mål. Utan tvekan är Maria en av de bästa examinatorerna på Chalmers, hennes engagemang har varit ovärderligt.

Ett särskilt tack går även till Johan Skårbratt, Rikard Back, Thomas Waldenstedt och Håkan Hörsten på Sortera Recycling för ert generösa deltagande, er expertis och för att ni delat med er av era insikter – ni har varit en viktig del av detta arbete.

Vi vill även tacka Siccum AB från Pajala, och ett extra tack till Alexander, för ert stöd och er hjälp under projektets gång.

Tack till er alla som gjort detta arbete möjligt!

Sammanfattning

This report investigates and compares three different methods for sludge drying: passive air drying, active air drying, and freeze separation using Siccum's technology. The aim was to evaluate each method based on energy consumption, drying efficiency, processing capacity, and potential environmental benefits. The evaluation was conducted through a comparative analysis of each method's technical and operational performance under controlled conditions.

The results show that passive air drying has the lowest energy demand but requires extensive space and time. Active air drying offers faster results at the cost of higher energy usage. Siccum's freeze separation technology demonstrated the highest energy consumption in the study, but also the greatest ability to process large material volumes through a closed and automated system.

Although energy-intensive, freeze separation may be advantageous in large-scale operations where high throughput, controlled processing, and reduced waste volumes are prioritized.

The choice of method should be based on specific operational needs, considering factors such as energy costs, available space, processing time, and environmental impact.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte & frågeställning	3
1.3 Avgränsningar	4
2. Teoretisk bakgrund	5
2.1 Torkning	6
2.2 Slam och sediment	8
2.3 Siccums maskin, dess konstruktion och funktion	10
2.4 Sorteras nuvarande torkningsmetod	11
2.5 Aktiv och passiv lufttorkning	13
2.5.1 Beräkning av tryckförlust genom kanaler	14
2.6 Lagkrav gällande deponering	15
3. Metod	16
3.1 Översikt över metodval	16
3.1.1 Datainsamlings- och analysmetoder.....	17
3.2 Kvantifiering av torrsustanshalt	18
3.2.2 Kvantifiering av TS-halten i Siccums maskin.....	19
3.2.3 kvantifiering av TS-halter i den aktiva och passiva lufttorkningsprocessen	20
3.3 Kvantifiering av energibehov	21
3.3.1 Energiförbrukning för Siccum metod	21
3.3.2 Energiförbrukning för Sorteras nuvarande process	21
3.3.3 Energiförbrukning för passiv och aktiv lufttorkningsprocess	22
3.4 Torkningsmetodernas lönsamhet ur ett transportperspektiv	26
3.5 Miljöfördelar med Alternativa Slambehandlingsmetoder	28
4. Resultat	29
4.1 Torkningsteknikernas effektivitet	29
4.1.1 Siccums effektivitet	30
4.1.2 Passiv och aktiv torkningseffektivitet	30
4.1.3 Sammanfattning av effektiviteten.....	31
4.2 Energikrävande processer	32
4.2.1 Energiförbrukning för Siccums frysseparationsteknik	32
4.2.2 Sorteras nuvarande metod	32
4.2.3 Aktiv lufttorkning	33
4.2.4 Sammanfattning av energiåtgången för de olika processerna	35
4.3 Lönsamhet ur ett transportperspektiv	36
4.4 Miljöfördelar med alternativa torkningstekniker	37
5. Diskussion	38
5.1 Sammanfattning av resultaten	38
5.2 Implikationer	39
5.3 Begränsningar	40
5.4 Förslag till framtida forskning	41

6 Slutsatser	41
6.1 Effektivitet i torkningsprocessen	41
6.2 Energiförbrukning och hållbarhet	42
6.3 Transportfördelar	42
6.4 Miljöfördelar	42
6.5 Sammanfattande slutsats	42
7. Referenser	43
Bilagor	45

1. Inledning

Denna rapport utförs på uppdrag från Sortera Materials, ett företag som hanterar olika typer av avfall inklusive byggavfall, farligt avfall och slam från vattenkällor. Sortera är specialiserade på att samla in, återvinna och processa dessa material med fokus på hållbara metoder som effektiviserar resursanvändningen och minimerar miljöpåverkan. Genom avancerade behandlingsmetoder och noggranna säkerhetsåtgärder säkerställer Sortera att hanteringen av material som slam, som ofta innehåller tungmetaller och organiska föroreningar, uppfyller strikta miljökrav.

1.1 Bakgrund

Slam och sediment ställer unika utmaningar i hanteringen, inte minst på grund av deras potentiella innehåll av skadliga ämnen. I Sverige klassificeras sådant material som innehåller farliga föroreningar enligt *Avfallsförordningen* (SFS 2020:614), som farligt avfall, vilket kräver noggranna hanteringsstrategier för att minimera riskerna för både miljön och människors hälsa. Denna rapport utforskar effektiva och hållbara torkningsmetoder som kan integreras i Sorteras befintliga processer för att ytterligare förbättra deras miljöprestanda och ekonomiska effektivitet.

För närvarande hanterar Sortera Materials slam genom att blanda det med torra material såsom gips och träflis. Denna procedur syftar till att förbättra slammets hanteringsegenskaper genom att öka dess viskositet, vilket är särskilt viktigt när det behöver transporteras till avlägsna deponier runt omkring i Göteborgs utkanter för slutlig deponering. Genom att tillsätta torkat material ökas slammets viskositet, vilket gör det mer lämpat för transport och minskar riskerna under logistikprocessen. Denna anpassning av slammets konsistens bidrar till en säkrare och effektivare hantering av avfallet. Dessutom är detta ett krav enligt förordningen om deponering av avfall (*Förordning om deponering av avfall*, SFS 2001:512, 8 §) eftersom det inte är tillåtet att deponera flytande avfall. Processen är utformad för att stabilisera materialet, minska dess spridningsrisk och följa lagkraven för hållbar och säker avfallshantering.

Sortera utforskar nya tekniker för att effektivisera slamhanteringen, däribland en innovativ maskin från företaget Siccum. Processen inleds med att slam och sediment med hög vätskehalt förs in i maskinen. För att underlätta hanteringen och göra materialet mer vätskeliknande blandas det inledningsvis med ytterligare vatten (homogenisering), vilket minskar dess viskositet. Inuti maskinen genomgår slammet en behandling där det först kyls till en specifik temperatur för att bilda kristaller (is). Därefter värms materialet upp för att separera vattnet från föroreningarna. Denna process påstås vara mycket effektiv och möjliggör en separation av upp till 90 % av vattnet från slammet med en energikonsumtion på endast 45 kWh/ton (Siccum, 2025). Genom denna metod kan slamhanteringen effektiviseras avsevärt, vilket bidrar till en mer hållbar och resurseffektiv hantering.

Andra mer traditionella metoder för att torka material inkluderar mekanisk torkning, vilket ofta utförs med en press eller centrifug. Dessa maskiner använder kraftig mekanisk påverkan för att effektivt pressa ut vatten ur materialet. En annan metod är värmestorkning, där man tillför värme till systemet för att påskynda avdunstningen av fukt. Slutligen finns metoden som kallas passiv lufttorkning, där materialet får stå och torka naturligt under en längre tid, vilket utnyttjar naturliga fenomen som vind och värme. Det befintliga sättet att blanda slammet med gips är resurskrävande. En mer effektiv metod skulle innebära avlägsnande av vattnet från slammet, vilket skulle minska transportkostnaderna genom lägre vikt och volym, samtidigt som det underlättar hanteringen och minskar mängden avfall som behöver deponeras.

Då Sortera strävar efter att kunna hantera större mängder slam och sediment de kommande åren söker de nya potentiella metoder som både är bättre ur ett ekonomiskt och hållbarhetsperspektiv än dagens process. Även om torkning av slam kan minska transportrelaterade utsläpp, är det nödvändigt att noggrant utvärdera hållbarheten hos själva torkningsprocessen. Det finns en risk att nya utsläpp genereras under torkningsförloppet, beroende på vilken teknik och energikälla som används. En utredning av miljöpåverkan från torkningsprocessen är därför viktig för att säkerställa att den totala miljönyttan är positiv.

1.2 Syfte & frågeställning

Syftet med projektet är att analysera och validera metoder för torkning av slam och sediment, med fokus på Siccums frysseparationsteknik. Examensarbetet undersöker teknikens effektivitet, slutprodukternas kvalitet (fukthalt, hållfasthet etc.) samt dess miljömässiga fördelar jämfört med traditionella metoder.

Utöver det kommer denna rapport även att undersöka under vilka förhållanden torkningsprocessen är ekonomiskt intressant för företaget Sortera, detta inkluderar en analys av hur slammets transportegenskaper förändras beroende på hur torrt materialet är. Transportegenskaper avser förändringar i materialets vikt och volym. Genom att kartlägga dessa förändringar kan rapporten ge en tydligare bild av hur torkningsprocessen kan påverka transportkostnader, logistik och hantering av slammet.

Problemformulering:

Hur väl fungerar frysseparationstekniken för att effektivt avlägsna vatten ur slam och sediment tagna från olika vattenmiljöer, såsom havsbotten, sjöar och andra vattendrag jämfört med traditionella avvattningsmetoder? Hur hög är kvaliteten på de slutprodukter som genereras genom processen vad gäller det torkade materialet? Med kvalitet avses här exempelvis fukthalt, hållfasthet och andra relevanta egenskaper hos det torkade materialet, beroende på dess avsedda användningsområde. Samt vilka miljömässiga och ekonomiska fördelar tekniken kan erbjuda jämfört med Sorteras traditionella metod för slamhantering?

Huvudproblem:

Hur effektiv är frysseparationstekniken för att avlägsna vatten från slam och sediment?

Frågeställningar

- *Hur effektiva är olika torkningstekniker för att avlägsna vatten från slam, med avseende på hur fukthalten förändras över tid?*

- *Hur energikrävande är frysseparationsprocessen jämfört med andra tekniker för slamhantering, och hur påverkar dess energiförbrukning hållbarheten?*
- *Vilka förhållanden gör att de olika torkningsmetoderna underlättar transporten av slam mest?*
- *Vilka är de potentiella miljöfördelarna jämfört med Sorteras nuvarande sätt att behandla slam?*

1.3 Avgränsningar

I den här studien ligger fokus på de frågor som företaget Sortera prioriterar och anser viktigast. Dessa frågor handlar främst om torkningsprestandan hos olika torkningsmetoder samt deras lönsamhet.

En viktig avgränsning är att jämförelsen endast görs mellan Siccums torkningsteknik och traditionella metoder, vilket är en medveten avvägning för att hålla studiens omfattning hanterbar inom ramen för 15 högskolepoäng. Jämförelsen kommer endast att vara mellan Siccums frysseparationsteknik, passiv & aktiv lufttorkning och det nuvarande sättet företaget Sortera behandlar slammet. Torkningsprestandan tar endast hänsyn till den energi som förbrukas per enhet avlägsnad fukt, och tiden de olika metoderna kräver.

Projektet kommer inte behandla djupgående analyser av miljökonsekvenser, såsom maskinens långsiktiga påverkan på miljön. Även logistiska processer, inklusive transport och lagring av slam utöver den potentiella lönsamhet torkningsprocessen kan medföra, ligger utanför projektets omfattning. Slutligen kommer ingen fullständig livscykelanalys (LCA) att genomföras för maskinen eller slamhanteringsprocessen.

De miljöparametrarna som kommer att analyseras kommer endast behandla klimatpåverkan från energianvändningen med fokus på CO₂-utsläpp. Avgränsningarna är gjorda för att fokusera på de mest relevanta faktorerna för projektets syfte

2. Teoretisk bakgrund

I syfte att få en grundläggande och noggrann förståelse av ämnet initieras den teoretiska bakgrunden i att undersöka den fysikaliska processen bakom torkning. Det gjordes även ett aktivt val att lägga fokus på att analysera vilka olika separeringsmetoder av vatten som var kompatibla med slam. Detta i syfte att kunna fokusera på, och endast jämföra de mest relevanta metoderna för just slam och sediment.

Mujumdar (2014) beskriver torkning som en termisk process för att avlägsna fukt. Fukten i ett material kan delas upp i två olika kategorier; fritt och bunden fukt/vatten. Den relativa luftfuktigheten (RH) beskriver hur mycket fukt det behöver vara i omgivningen för att fukten i materialet inte ska avdunsta.

- Fritt vatten befinner sig i materialets mikroplaster eller på ytan av materialet. Då det inte är bundet till materialet har det fria vattnet en hög relativ luftfuktighet 70-80% och det är den enklaste typen av vatten att avlägsna från materialet
- Bundet vatten är kopplat till materialet via intermolekylära krafter. Den relativa luftfuktigheten beror på material och befinner sig mellan 10% och 70%. Den bundna fukten kräver mer energi att avlägsna då den är kemiskt bunden till materialets molekylära struktur.

En annan skillnad på fritt och bundet vatten är deras ångtryck, detta också på grund av hur vattnet är närvarande i materialet. Med ångtryck menas det tryck som utövas av ångmolekylerna när en vätska och dess ånga befinner sig i jämvikt vid en viss temperatur (Encyclopedia Britannica, n.d.). Då det bundna vattnet är fysiskt och kemiskt kopplat till materialet har det ett lägre ångtryck, alltså tar det längre tid för molekylerna att övergå från den flytande fasen till gasform. När en vätska kommer i kontakt med en torr gas, börjar den avdunsta och övergår till gas-fas som ånga.

2.1 Torkning

Enligt Mujumdar (2014) sker två huvudsakliga processer under torkning samtidigt:

1. Energi (värme) överförs från omgivningen till ytan för att avdunsta fukt.
2. Intern fukt transporteras från materialets inre till ytan.

Det finns flera olika värmeöverföringsmetoder där energi kan överföras till kroppen; konvektion, konduktion och strålning är de vanligaste metoderna för torkning, med det finns även dielektrisk och mikrovågsbaserad torkning.

Enligt van 't Land (2012) finns det många variabler som påverkar torktiden. För tydlighetens skull delas parametrarna upp i 2 olika grupper och förklaras i tabellform.

Den första kategorin; *Tabell 1*, är variabler som hör till **materialets egna egenskaper**:

Tabell 1 visar hur materialegenskaper som porositet, fukttinnehåll, partikelstorlek och kemisk sammansättning påverkar torkprocessen.

Porositet och densitet	Material med hög porositet och låg densitet tenderar att torka snabbare eftersom de tillåter enklare fukttransport.
Fukttinnehåll	Initialt fukttinnehåll påverkar torktiden; ju mer fukt som finns i materialet, desto längre tid tar det att torka.
Partikelstorlek och form	Mindre partiklar med större yta i förhållande till volym torkar snabbare på grund av ökad exponerad yta.
Kemisk sammansättning	Vissa material binder fukt starkare på molekylär nivå, vilket kan fördröja torkprocessen.

Den andra kategorin; *Tabell 2*, består utav variabler som är kopplade till **torkprocessens parametrar**:

Tabell 2 beskriver faktorer som påverkar torkprocessen, inklusive luftfuktighet, luftflöde, torktemperatur, torkmetod samt materialets tjocklek och placering.

Luftfuktighet	Lägre relativ luftfuktighet i omgivningen underlättar avdunstning, medan hög luftfuktighet kan bromsa torkprocessen
Luftflöde	Ett ökat luftflöde över materialets yta hjälper till att avlägsna avdunstad fukt, vilket påskyndar torkningen
Torktemperatur	Högre temperaturer i torkprocessen kan öka torkhastigheten
Torkmetod:	Olika torkmetoder, såsom konvektion, konduktion eller strålning, har olika effektivitet beroende på materialtyp och applikation
Materialets tjocklek och placering	Tjockare lager av material kan leda till ojämn torkning och längre torktid

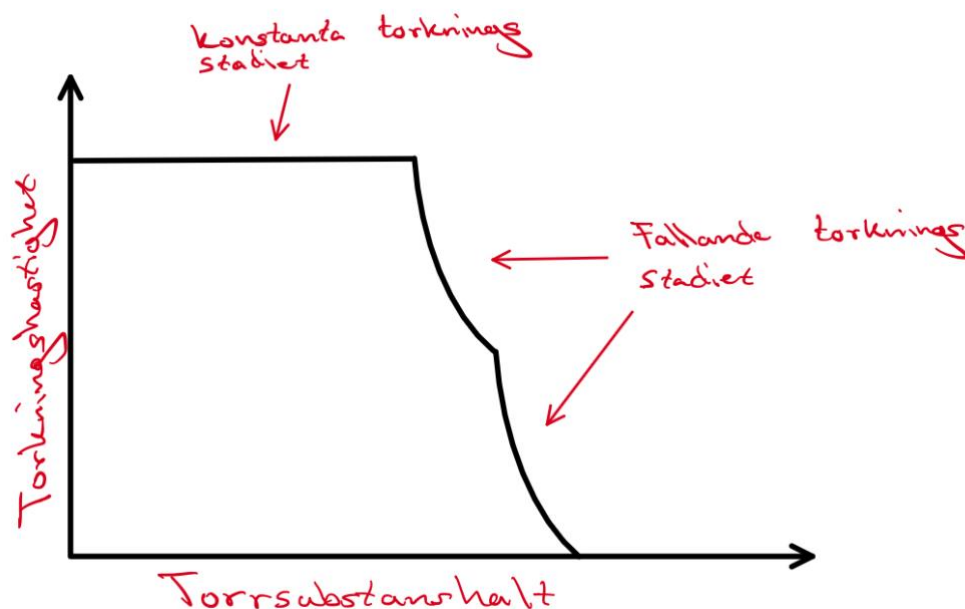
Enligt Mujumdar (2014) kan fukt finnas i fasta material i bunden och/eller obunden form, och avlägsnandet av obunden fukt sker antingen genom avdunstning eller sublimering.

Avdunstning inträffar när ångtrycket från materialets yta blir lika med eller högre än det atmosfäriska trycket, vilket ofta uppnås genom att värma materialet till kokpunkten. Vid känsliga material kan trycket sänkas för att reducera kokpunkten, eller så kan fukten avlägsnas genom sublimering, exempelvis vid frystorkning, där is omvandlas direkt till ånga vid lågt tryck. Konvektiv torkning innebär att varmluft leds över materialet, vilket kyler luften samtidigt som fukten överförs till denna. Detta kräver att luftens ångtryck är lägre än materialets.

Torkningsprocessen består av flera stadier. Inledningsvis, i det så kallade “konstanta torkningsstadiet”, avdunstar ytlig fukt kontinuerligt, vilket gör att torkningshastigheten förblir konstant. När den kritiska fukthalten nås börjar fukt från materialets inre transporteras ut via diffusion. Detta markerar övergången till det fallande torkningsstadiet, där avdunstningshastigheten gradvis minskar. Under denna fas kan materialets egenskaper,

såsom hög densitet eller små porer, orsaka att diffusionen blir den begränsande faktorn. Om materialet krymper eller bildar ett hårt ytskikt, så kallad "casehardening", kan det ytterligare försvåra fuktens rörelse.

I praktiken kan vissa material kräva kvarvarande fukthalt för att undvika skador, vilket innebär att en del av torkningen måste ske under det konstanta torkningsstadiet se figur 1. För andra material, där en mycket låg slutlig fukthalt krävs, spelar det fallande torkningsstadiet en avgörande roll. Faktorer som temperatur, luftfuktighet, materialtjocklek och ledningsförmåga påverkar torkningshastigheten, särskilt under senare stadier där värmetransport och diffusion är styrande. Vid design av torkutrustning är det därför viktigt att ta hänsyn till dessa egenskaper.



Figur 1 visar hur torkhastigheten förändras i förhållande till torrsubstanshalten (TS-halt).

2.2 Slam och sediment

Slam består av en blandning av finfördelade partiklar, mineraler och organiskt material som ackumuleras på havsbotten. Det bildas genom naturliga processer som biologisk nedbrytning av organiska material från växter och djur, samt erosion där partiklar transporteras från land till hav via floder och älvar. Sedimentation sker när dessa partiklar sjunker till botten och packas över tid. Bortsett från dessa naturliga processer så påverkas slammets bildning av

människor. Exempelvis genom spridning av föroreningar, muddring som omfördelar sediment och utsläpp som kemikalier och mikroplaster (Havs- och vattenmyndigheten, 2023).

Konsistensen på slam är mjuk och har en hög vattenhalt, vilket gör den känslig för miljöförändringar. Det har en viktig roll i marina ekosystem särskilt i kol- och näringscykler (ICES, 2023). Slam kan också fungera som en reservoar för föroreningar, vilket innebär att det kan ha både fördelaktiga och skadliga effekter på marina organismer. På grund av denna komplexa roll är det avgörande att studera och hantera slam inom havs- och vattenförvaltning (Havs- och vattenmyndigheten, 2023).

Förorenat slam utgör en potentiell spridningskälla för tungmetaller och kemikalier som är bundna till sedimentpartiklar. Dessa föroreningar kan frigöras och spridas i vattenmiljön genom processer som strömmar, muddring eller bottenrålning, vilket kan påverka vattenkvaliteten och utsätta marina organismer för skadliga ämnen. Bottenlevande arter, såsom musslor och fiskar, löper särskilt stor risk att absorbera dessa gifter, vilket kan resultera i bioackumulation och negativ påverkan på hela det marina ekosystemet (Forskning.se, 2023).

Slam i havsbotten finns i en blandning av organiska och oorganiskt material som bildas genom naturliga processer eller mänsklig aktivitet (Science AQ, 2023). Detta slam innehåller partiklar från land, atmosfäriskt material samt marina organismer. I svenska havsområden har studier visat att bottensedimentet innehåller föroreningar, exempelvis ämnen som PFAS (SGU, 2022). Dessa föroreningar kan påverka både människors hälsa och miljön, vilket gör övervakningen av sedimentkvaliteten avgörande. På botten av havet, och andra vattendrag, ligger ett tjockt lager av slam som ett täcke. Täcket döljer konturerna av de berg och stenar som finns på havsbotten. I dessa samhällen på botten av havet lever olika djur men inga växter (Livet i havet, 2024).

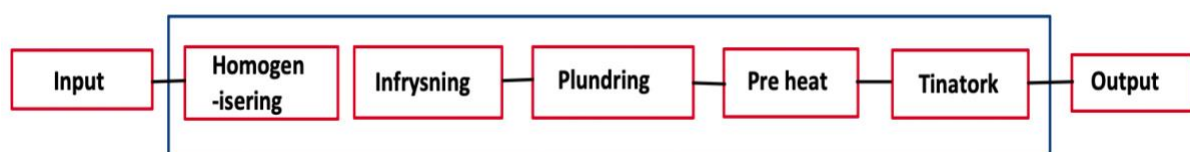
På havsbotten finns flera olika typer av slamsorter, bland annat organiskt slam, förorenat slam, kalkslam och sapropel, som är ett organiskt rikt sediment bildat i syrefattiga miljöer. Det finns även sediment på havsbotten som består av fasta partiklar som deponeras på havsbotten. Sediment i jämförelse med slam är oftast större och varierar i kornstorlek från stenblock till sand (NOAA, 2023). Skillnaden mellan slam och sediment är att sediment har en lägre vattenhalt, varierande kornstorlek men de båda är viktiga för havsbotten.

Miljöpåverkan av sediment är en faktor som påverkar det marina ekosystemet. I havsbotten transporteras sediment ofta över långa avstånd i havsströmmar och floder (Naturskyddsföreningen, 2023).

Sediment transporteras ofta över långa avstånd av havsströmmar och floder (Naturskyddsföreningen, 2023). Sediment förekommer i olika storlekar och former, där några exempel inkluderar sand, lera, silt, mangannoduler (Metallrika klumpar på havsbotten, främst bestående av mangan) och glaciärt sediment. De olika typerna av sediment har varierande egenskaper och strukturer, vilket påverkar deras beteende i vattenmiljön. Sand, exempelvis, kännetecknas av en hög permeabilitet och återfinns främst längs kuster samt i grunda havsområden (ICES, 2023). Förekomsten av olika sedimenttyper varierar beroende på miljöförhållanden, och varje kategori har sina unika fysikaliska och kemiska egenskaper.

2.3 Siccums maskin, dess konstruktion och funktion

Siccums infrysningsenhet består av en torkningsenhet (Tinatork) integrerad i en container. Processen fungerar så att slam eller sediment matas in, och i slutändan levereras det färdigprocessade materialet (residual) ut. Det material som bearbetas i denna process transporteras automatiskt mellan de olika stegen med hjälp av en bandtransportör. Frysavvattningsanläggningen, tillsammans med de olika delstegen i processen, illustreras schematiskt i figur 2 för en tydligare översikt (WSP 2022).



Figur 2. En schematisk skiss över de olika processtegen i frysavvattningsanläggningen, där den blå rektangeln markerar de olika stegen inom containern.

Processen inleds med muddring, som utgör det första steget och fungerar som inmatningsfas. För att säkerställa ett jämnt flöde till avvattningsanläggningen används IBC-tankar som mellanlagringsenhet. En IBC-tank är en stor och tålig behållare som man ofta använder för att förvara eller transportera vätskor och andra material, vanligtvis upp till 1 000 liter. Från dessa pumpas materialet vidare till infrysningssteget, där det först passerar genom ett

homogeniseringssteg som späder ut materialet till önskad viskositet, som är placerat inuti en container (blåa fyrkanten).

Infrysningen sker med hjälp av en kyl-enhet där kylan genereras av ett kylaggregat och en kompressor. Genom att styra pumpningen från IBC-tankarna kan flödet till infrysningseenheten regleras noggrant. Under pilotförsöket anpassas flödet kontinuerligt för att utvärdera systemets olika funktioner, med ett genomsnittligt flöde på cirka en liter per minut (WSP, 2022).

När infrysningen är slutförd transporteras det frusna materialet ut ur infrysningseenheten i ett moment som kallas plundring. Plundring innebär att isbitarna, som bildats under infrysningen, avlägsnas från kyl-enheten för att möjliggöra fortsatt bearbetning av materialet. Därefter förs det vidare via en transportör till Pre-heat-steget, där en kombination av värme och luftflöde används för att snabbt avlägsna fritt vatten och porvatten som bildats under infrysningen. Detta steg är avgörande för att separera vattnet från det fasta materialet.

Pre-heat-steget följs av Tina-tork-steget, där materialet tinas och ytterligare vatten avdunstar för att uppnå önskad torrsubstanshalt. Torkningsprocessens längd varierar beroende på de specifika krav som ställs på slutprodukten, men den pågår vanligtvis i flera timmar (WSP, 2022).

2.4 Sorteras nuvarande torkningsmetod

Den nuvarande processen påbörjades med att lastbilar lastade med slam och sediment anländer till Sortera Materials anläggning i Torslanda. Denna anläggning valdes eftersom den hade den nödvändiga licensen för att hantera och bearbeta materialet enligt gällande miljö- och säkerhetskrav. Vid ankomsten kör lastbilarna till ett avsett dumpningsområde, där de tömmer sitt innehåll, likt den inringade blå lastbilen i bakgrunden av figur 3.

Efter att materialet hade lossats tog en hjullastare över för att jämnt fördela och sprida ut slammet och sedimentet i en slät pool. Detta moment var avgörande för att säkerställa en jämn fördelning av materialet inför den fortsatta behandlingsprocessen.



Figur 3. Hjullastare som sprider ut slam jämnt i en pool för en jämn fördelning inför vidare bearbetning.

Den följande bilden i figur 4 visar ett exempel på hur området ser ut efter att de inledande processtegen har slutförts och materialet har spridits ut. För att underlätta den fortsatta bearbetningen är området omgivet av murar, vilket gör det enklare att kontrollera och hantera materialet inför nästa steg i processen. Dessa murar hjälper till att hålla materialet på plats och säkerställer en mer effektiv blandning och omfördelning i de kommande bearbetningsstegen.



Figur 4. Uppfördelat slam i en pool efter spridning, vilket möjliggör en jämn och kontrollerad vidarebearbetning.

På Sorteras anläggning i Torslanda finns två separata platser där materialet bearbetas, vilket illustreras i figur 3 och figur 4. När allt material har jämnats ut blandas det med antingen sikt,

siktrest, gips och/eller ibland även annat relativt finfördelat material, beroende på vad Sortera har på anläggningen. Syftet med denna inblandning är att ge materialet en fastare form, vilket underlättar hanteringen vid transport och deponering.

I figur 5 visas en grävmaskin som blandar restmaterialet med slammet och sedimentet innan det lastas på lastbilar. Därefter transporteras materialet till deponier runt om i Göteborg samt till områden i stadens utkanter.



Figur 5. En grävmaskin som blandar sikt och annat relativt finfördelat material med slam och sediment i poolen för att skapa en blandning inför vidare transport till deponier.

2.5 Aktiv och passiv lufttorkning

Processen inleds med att materialet fördelas jämnt över en yta i ett mellan 0,5 och 1 cm tjockt lager. Materialet bearbetas med två olika metoder beroende på om lufttorkningen är aktiv eller passiv. Den första metoden innebär att materialet torkar passivt, utan någon energikrävande process, där det enbart avdunstar tills det uppnår maximal torrhet. Den andra metoden, aktiv lufttorkning, använder fläktar för att påskynda torkningsprocessen. För att uppskatta den teoretiska energiförbrukningen vid aktiv lufttorkning behöver tryckförlusten

(formel 3) och luftflödet beräknas (formel 2). Därefter kan fläktens effektbehov beräknas (formel 1) (Cengel & Cimbala, 2014):

$$P = \frac{\Delta p \times Q}{\eta} \quad (1) \qquad Q = A_t \times v \quad (2)$$

P; fläktens effektbehov i Watt

Δp ; Tryckfall i Pa

Q; Luftflöde i m^3/s

η ; fläktens verkningsgrad

A_t ; tvärsnittsarean i m^2

v ; Lufthastighet i m/s

Förutom det statiska tryckfallet i kanalsystemet måste även det dynamiska trycket tas med i beräkningen. Detta är den tryckskillnad som krävs för att accelerera luften till den önskade hastigheten, och beräknas enligt formel 3 (Cengel och Cimbala, 2014)

$$\Delta p_{dyn} = \frac{\rho v_f^2}{2} \quad (3)$$

Δp_{dyn} = dynamisk tryckförlust (Pa)

ρ = luftens densitet kg/m^3

v_f = luftens hastighet vid fläktens utlopp m/s

Det totala trycket som fläkten måste övervinna är därmed summan av det statiska och dynamiska trycket:

$$\Delta p = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn} \quad (4)$$

2.5.1 Beräkning av tryckförlust genom kanaler

När luft rör sig genom en kanal uppstår tryckminskning på grund av friktion mellan luften och kanalens väggar. Denna minskning behöver beräknas för att kunna dimensionera fläktar och uppskatta hur mycket energi som krävs. Ett sätt att räkna ut tryckminskningen är att använda Darcy Weisbachs ekvation. Den kopplar samman tryckfallet med kanalens längd, lufthastighet, densitet, hydraulisk diameter och en friktionsfaktor (formel 5) (Cengel och Cimbala, 2014).

Om kanalen inte är cirkulär, som i fallet med en rektangulär kanal, behöver man först räkna ut den hydrauliska diametern (formel 6). Den beräknas med hjälp av kanalens tvärsnittsarea och den ”våta” omkretsen (formel 7) (White, 2011).

För att ta reda på om flödet är laminärt eller turbulent används Reynolds tal (formel 8). Det beror på lufthastigheten, luftens densitet, viskositet och den hydrauliska diametern. Om flödet är turbulent, vilket det ofta är om Reynolds tal är över 4000, kan friktionsfaktorn uppskattas med Blasius ekvation, under förutsättning att kanalens väggar är släta (formel 9) (White, 2011).

Dessa beräkningar är viktiga när man vill förstå hur mycket energi som går åt vid transport av luft i tekniska system, som till exempel i torkkanaler eller ventilationsanläggningar.

$$\Delta p_{stat} = f \times \frac{L}{D_h} \times \frac{\rho v^2}{2} \quad (5), \quad D_h = \frac{4A}{V_0} \quad (6), \quad V_0 = 2(b + h) \quad (7),$$

$$R_e = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (8) \quad f = 0.3164 \times R_e^{-0.25} \quad (9)$$

Δp_{stat} = Statisk tryckförlust (Pa)

Δp_{dyn} = Dynamisk tryckförlust (Pa)

f = friktionsfaktor

L = kanalens längd (m)

D_h = hydrauliska diametern (m)

ρ = luftens densitet (kg/m³)

v = Lufthastighet genom kanalen (m/s)

A = kanalens area (m²)

V_0 = våta omkretsen (m)

R_e = Reynolds tal

μ = Vätskans/gasens viskositet. ($\approx 1.81 \times 10^{-5}$), kg/(ms)

b = bredd på kanal (m)

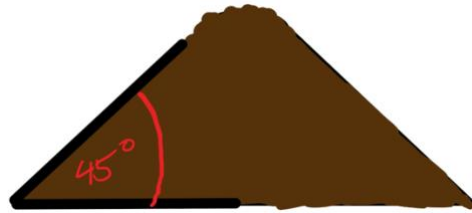
h = höjd av kanal (m)

2.6 Lagkrav gällande deponering

Lagkraven gällande deponering av blöta massor som till exempel slam/sediment är otydliga.

Det anges dock i svensk lagstiftning att deponering av flytande material inte är tillåten. Enligt Förordning (2001:512) om deponering av avfall anges i 8 § att flytande avfall inte får deponeras (SFS 2001:512). En mer djupare definition på vad flytande i denna mening betyder

ges ej. Då perceptionen av vad flytande material inte enbart beror på TS-halten utan andra faktorer som exempelvis viskositet och ”friktion” i materialet är det också svårt att ge en definition på vad flytande innebär. Företaget Sortera använder sig av den fysiska egenskapen att materialet ska vara stapelbart i förhållandet 1:1. Med andra ord innebär detta att slammet anses som fast om det kan staplas på en hög med lutningen minst 45° . Detta illustreras nedan med figur 6.



Figur 6. En slam hög med en lutningsvinkel på 45° , vilket används för att avgöra om materialet kan klassificeras som fast.

3. Metod

Denna studie syftar till att analysera och jämföra olika torkningsmetoder med avseende på energiåtgång, torkningseffektivitet och transportrelaterade konsekvenser. För att uppnå detta har både praktiska experiment och insamlade data från industrin använts. Genom en kombination av kvantitativa mätningar och kompletterande information från företag möjliggörs en utvärdering av metodernas effektivitet, samt ekonomisk och miljömässig hållbarhet.

3.1 Översikt över metodval

För att samla in och analysera data i denna studie har en kombination av experimentella tester och insamlad information från både Sortera och Siccum samt dess anställda använts. De experimentella testerna syftar till att utvärdera materialets egenskaper och effektiviteten hos olika metoder, medan den kompletterande informationen från företagen ger en bredare förståelse för befintliga processer och praktiska tillämpningar.

Valet av metoder har baserats på studiens syfte att kvantifiera och jämföra olika torkningsmetoder utifrån energiåtgång, massreduktion och transporteffektivitet. Testerna har genomförts under kontrollerade förhållanden för att säkerställa tillförlitliga resultat, och företagsdata har samlats in genom intervjuer och befintlig dokumentation. Kombinationen av dessa metoder möjliggör en analys av hur olika faktorer påverkar effektiviteten och lönsamheten i de undersökta processerna.

3.1.1 Datainsamlings- och analysmetoder

Genom att samla in data och beräkna energiåtgång per avlägsnad fuktenhet (kW/behandlat ton material), materialförändringar i vikt och volym till följd av torkningsprocessen, tidskraven för de olika metoderna samt transportkostnader och utsläpp, kan de frågor som ställts i syftet besvaras.

För att utvärdera hur effektiva de olika torkteknikerna är för att avlägsna vatten från slam, både ur ett tids- och energiperspektiv analyserades materialets torrsubstanshalt (TS-halt) vid bestämda tidpunkter under torkningsprocessen. Genom att relatera TS-halten till tiden kunde effektiviteten ur ett fuktighet per tid-perspektiv bedömas. För att uppskatta den energimässiga effektiviteten jämfördes energiförbrukningen med förändringen i TS-halt. För att fullt ut kunna kvantifiera hur energikrävande de olika metoderna är måste även vikten av materialet som torkas tas i beaktning i relation till både tid och energiförbrukning alltså kWh/ton material som torkas.

För att besvara frågan "*Vilka förhållanden gör att de olika torkningsmetoderna underlättar transporten av slam mest?*" jämfördes den energi som krävs för torkningsprocesserna med den energi som sparas genom minskad vikt och volym, vilket resulterar i färre lastbilstransporter. Utöver energiförbrukningen och omfattningen av materialets massa- och viktreduktion påverkas resultatet även av faktorer såsom elpris, transportsträcka och dieselkostnad.

De potentiella miljöfördelarna har uppmätts i mängden besparad koldioxidutsläpp på grund av färre transporter. Även denna fråga kommer behandla materialförändringarna med avseende på vikt och volym. Då mängden koldioxidutsläpp påverkas främst av transportsträckans längd, redovisas det därför huvudsakligen som en procentuell förändring mellan företaget Sorteras nuvarande torkningsmetod och de alternativa torkningsmetoder som undersöks.

För att säkerställa en jämn behandling av alla torkningsprocesser har flera åtgärder vidtagits. Materialet/slammet som används i de olika processerna kommer från samma sats (batch), vilket innebär att det har samma innehåll och torrsubstanshalt. För att bevara torrsubstanshalten har materialet förseglats så att dess innehåll förblir oförändrat fram till testdagen. Dessutom analyseras temperatur och fuktighet i samtliga processer, och försök gjordes att upprätthålla liknande initiala förhållanden avseende temperatur och luftfuktighet.

3.2 Kvantifiering av torrsubstanshalt

Kvantifieringen av torrsubstanshalten är den mest avgörande faktorn i analysen, eftersom den är direkt kopplad till samtliga frågeställningar i rapporten. Då Sorteras nuvarande "torkningsmetod" inte innebär en faktisk torkning av materialet, utan i stället en sänkning av TS-halten genom utblandning med redan torrt material, kommer ingen kvantifiering av TS-halten för denna process att fastställas.

Torkningsmetoden där kvantifiering av torrsubstanshalten genomfördes var Siccums frysseparationsteknik, samt den passiva och aktiva lufttorkningsprocessen. Metoden benämns direktuppvärmningsmetoden, och utfördes av rapportens författare. Den går ut på att materialet vägs både före och efter torkning, där torkningen genomfördes i en stekpanna på låg värme. Genom att jämföra vikterna före och efter torkning kunde torrsubstanshalten beräknas. Denna metod är en direkt och praktisk kvantifieringsmetod som möjliggör snabb analys av materialets vatteninnehåll se figur 7 för en visuell representation av torkningsprocessen.



Figur 7. En bild på direktuppvärmningsmetoden.

3.2.2 Kvantifiering av TS-halten i Siccums maskin

På grund av att installationen av Siccums maskin, hos Sortera, blev försenad fick materialet skickas till Siccum i Pajala, där det testades i en mindre testmaskin. Materialet samlades upp vid två tillfällen, en gång under torkningsprocessen och en gång direkt efter att processen avslutats. Det skickades därefter direkt tillbaka till Göteborg i en förseglad behållare för att undvika yttre påverkan och bevara materialets ursprungliga egenskaper. När slammet väl var tillbaka i Göteborg gjordes tester på TS-halt med direktuppvärmningsmetoden.



Figur 8. Material i förseglade behållare skickat från Siccum i Pajala. 1,5 och 3h torktid.

3.2.3 kvantifiering av TS-halter i den aktiva och passiva lufttorkningsprocessen

För att undersöka hur både aktiv och passiv lufttorkning påverkar torkhastighet och förändring i torrsubstanshalt (TS), genomfördes två typer av praktiska försök med liknande testupplägg.

I båda fallen spreds slammet ut i mellan 0,5 och 1 cm tjockt lager över en yta av 0,33 m². För den aktiva lufttorkningen riktades en fläkt med känd effekt och luftflöde horisontellt mot ytan för att skapa ett kontrollerat luftflöde över materialet. I den passiva lufttorkningen torkades materialet under samma förhållanden men utan tillförsel av fläkt eller annan extern energi.

Under arbetets gång utfördes successiv stickprovstagning för att analysera materialets TS-halt. Praktiskt innebar detta att stickprover togs från det utspridda slammet vid bestämda tidsintervall under processens gång. Eftersom fläktens luftflöde inte är jämnt fördelat över det utspridda slammet, togs varje stickprov genom att samla material från flera olika delar samtidigt, detta illustreras med figur 9.



Figur 9. Illustration av tagna stickprov, där varje stickprov representeras med en egen färg. I de fall där lufttorkningsprocessen kvantifieras, visualiserar pilarna luftflödet med de tre pilarna.

Dessa delprover blandades och betraktades som ett enskilt stickprov. För att minska

risken för slumpmässiga variationer upprepades försöket med aktiv torkning vid två tillfällen med samma förutsättningar. Stickproven behandlades kronologiskt; så snart ett enskilt stickprov var färdigt, påbörjades torkningen och mätningar av torrsubstanshalten utfördes omedelbart med hjälp av direktuppvärmningsmetoden.

3.3 Kvantifiering av energibehov

Kvantifieringen av energibehovet beräknades i flera steg utifrån de olika processer som användes. Data samlades in från elmätare för de olika processerna, och för de processer som involverade fler delmoment togs även specifika värden för varje enskilt delmoment fram. Genom att analysera denna data erhöles en detaljerad översikt av varje process totala energibehov.

3.3.1 Energibehov för Siccum metod

Det installerades en elmätare i början av processen för att exakt mäta energiförbrukningen hos maskinen. Genom denna metod registrerades energin som förbrukades vid bearbetning/torkning av slammet. Utifrån den insamlade data genomfördes analyser för att undersöka hur energiförbrukningen påverkades av TS-halten och torkningstiden.

3.3.2 Energibehov för Sorteras nuvarande process

Energiförbrukningen för bearbetning av material beräknades algebraiskt baserat på information från arbetare vid Sortera (*Hörsten, 2025*):

- Hjullastare har en förbrukning mellan 15 och 18 liter/timma.
- För bearbetning av 1000ton/dag används 3 hjullastare.
- Under 1 dag kör hjullastaren 8 timmar

För att kunna jämföra dessa torkningsprocesser väljs kWh/ton som den gemensamma energienheten. I detta fall konverteras antalet diesel per ton till den gemensamma energienheten. 1 liter diesel = 9,9633 kWh (Stockholms stad, n.d.). För att få fram kWh/ton användes (formel 10):

$$E = \frac{h \times t \times n}{m} \quad (10)$$

E; energin i kWh/ton

h; hjullastarens förbrukning per timma i kWh

t; antal timmar hjullastaren är i drift

n; antal hjullastare i drift

m; mängd bearbetat material i ton

3.3.3 Energibehov för passiv och aktiv lufttorkarprocess

Analysen av energiförbrukning för de aktiva och passiva torkmetoderna baseras både på det praktiska test av aktiv och passiv lufttorkning som beskrivs i avsnitt 3.2.3. och det uträknade energibehovet för Sortera 3.3.2. För en helhetsbild av energianvändningen betraktades denna process som två olika delmoment:

1. Utspridning av material
2. Lufttorkning med fläkt

Energiförbrukningen för utspridning av material beräknades utifrån energiförbrukningen i Sorteras nuvarande process. Det gjordes ett kvalificerat antagande om att energiförbrukningen för utblandning av material (Sorteras nuvarande process) är ungefär lika stor som den energi som krävs för att sprida ut materialet. Detta antagande baseras på att hjullastarna förväntas behöva ungefär lika lång tid för att sprida ut materialet som för att blanda det med annat torrt material.

För att kvantifiera energiförbrukningen per avlägsnad fuktenhet för den aktiva torkningsprocessen behövde även luftflödet bestämmas. Luftflödet beräknades utifrån anemometermätningar nära materialytan (figur 10). Endast den yta där luftflöde kunde bekräftas inkluderades i energi och torkutvärderingen. Luftflödet över en yta bestämdes genom att beräkna medelvärdet över olika delar av slammets yta.



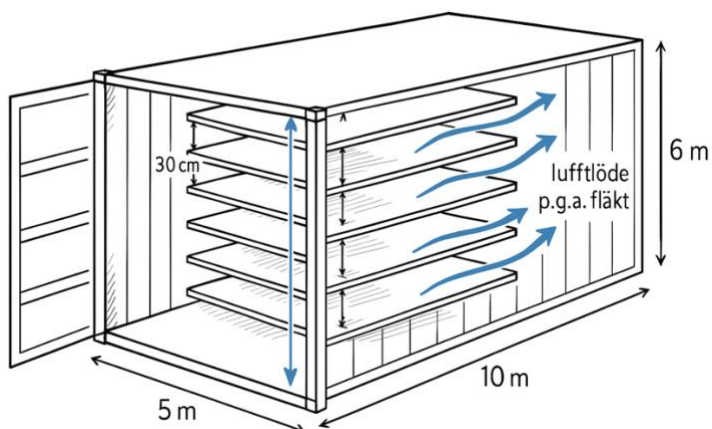
Figur 10 en bild på när luftflödet mäts med en anemometer.

För att uppskatta energibehovet vid torkning av större mängder material med aktiv lufttorkning användes en teoretisk beräkningsmetod snarare än en direkt uppskalning av mätdata från den fläkt som användes i laboratorieförsöken. Syftet med detta tillvägagångssätt var att skapa en mer representativ uppskattning av energiåtgången vid industriell torkning, anpassad till faktisk fläktdimensionering och luftflödesbehov.

I de praktiska försöken spreds materialet ut i ett tunt skikt, och en mindre fläkt blåste luft över materialytan. Energiförbrukningen för denna fläkt kunde i teorin mätas direkt (i watt)

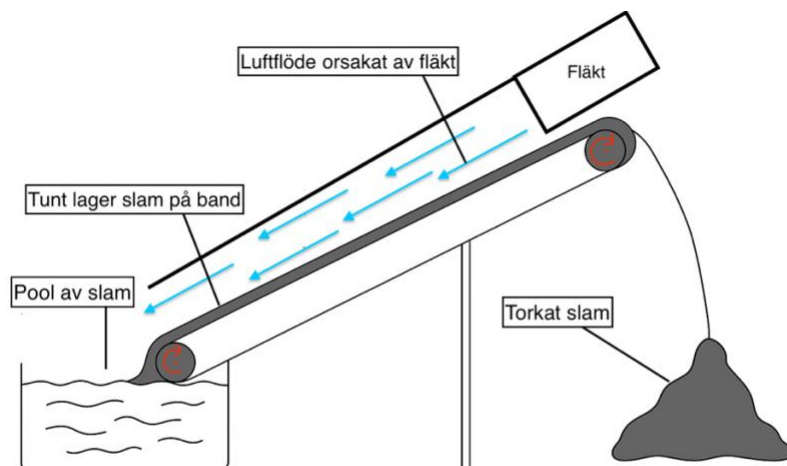
och multipliceras med den faktiska torktiden. Dock skulle en sådan metod ge missvisande resultat vid uppskalning till större volymer material. Anledningen är att den lilla fläkten blåste över ett betydligt större område än den aktiva torkytan där torrsubstansförändringen observerades. Det innebär att fläktens energiförbrukning i laboratoriemiljö inte direkt motsvarar den specifika energiåtgången per kvadratmeter effektivt torkad yta, och därför inte kan skalas linjärt till större industriprocesser utan att introducera betydande fel.

Eftersom 1 m² utspritt slam, enligt testförhållandena, vägde 1 kg, skulle det krävas 1000 m² yta för att torka 1 ton slam. I stället antogs två olika mer areaeffektiva modeller. Den första benämns som "containermodell" eller "aktiv lufttorkning 1m/s" och har dimensionerna 10 meter lång, 5 meter bred och 6 meter hög, där materialet kan staplas i flera horisontella skikt med fria mellanrum mellan skikten (20 skikt, cirka 0,3 meter mellanrum). Denna lösning möjliggör att 1 ton material torkas under en mindre area. Detta illustreras med Figur 11.



Figur 11 Containermodell med aktiv lufttorkning med utsatta mått för att få en yta på 1000 m².

Den andra, mer platseffektiva modellen benämns "Rullbandsmodellen" eller "aktiv lufttorkning 8m/s". Den består av ett långsamtgående rullband med en fläkt monterad ovanför bandet som blåser luft längs med bandets längdriktning, i motsatt riktning mot bandets rörelse. Bandet är 15 meter långt och 2 meter brett, vilket ger en total torkyta på 30 m². Bandets nedre del är nedsänkt i en behållare med slam, där ett tunt lager material fastnar på bandet och därefter transporteras genom torkzonen. För att styra luftflödet är bandet inramat av väggar, vilket skapar en kanalstruktur som säkerställer att luften effektivt leds över materialytan. Detta illustreras i figur 12 nedan.



Figur 12 Rullbandsmetoden, där slam fastnar på bandet, torkas av en fläkt, och sedan ramlar ner i en hög

Beräkningsmetod:

För att uppskatta fläktens energiåtgång i kWh per ton material i den aktiva lufttorkningsprocessen tillämpades en stegvis beräkningsmetod. Den inleddes med att den statiska tryckförlusten fastställdes med hjälp av Darcy–Weisbachs ekvation (formel 5), kompletterat med beräkningar av hydraulisk diameter (formel 6), våt omkrets (formel 7), Reynolds tal (formel 8) och friktionsfaktorn enligt Blasius (formel 9). Därefter beräknades det nödvändiga luftflödet Q enligt formel (2). Det dynamiska tryckfallet, som uppstår när luften accelereras i containermodellen till en på förhand vald utblåsningshastighet om 15 m/s baserat på tekniska och praktiska överväganden, beräknades med hjälp av formel (3) och adderades till den statiska tryckförlusten för att ge det totala tryckfallet Δp . Slutligen användes formel (1) för att beräkna fläktens totala effektbehov.

Parametrar och storlekar som använts i dessa beräkningar för containermodellen redovisas i tabell 3 nedan.

Tabell 3 parametrar och storlekar för beräkningsmetoden i Containermodellen.

Parameter	Storlek
L ; kanalens längd	10m
b ; kanalens bredd	5m
h ; kanalens höjd	0,3m
p ; luftens densitet	$1,2 \text{ kg/m}^3$
v ; Lufthastighet	1m/s
A ; kanalens tvärsnittsarea	$(5\text{m} \times 0,3\text{m}) = 1,5\text{m}^2$
μ ; luftens viskositet	$\approx 1,81 \times 10^{-5} \text{ kg/(ms)}$
η ; fläktens verkningsgrad	0,6
A_t ; tvärsnittsarean i m^2 fört containern	$(5\text{m} \times 6\text{m}) = 30\text{m}^2$
v_f ; lufthastighet vid fläktens utlopp	15m/s (baseras på en fläkt med radie 0,75m)

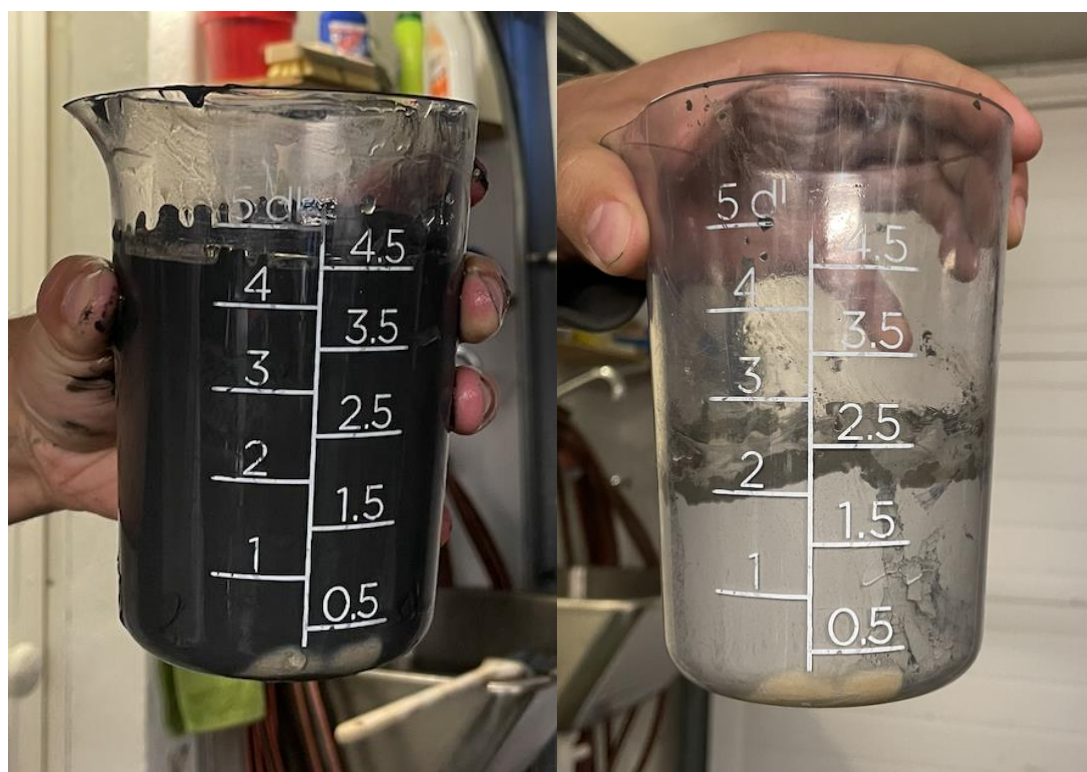
Beräkningsmetoden för Rullbandsmodellen är densamma som för Containermodellen, med enda skillnaden att vissa parametrar har andra värden.

Tabell 4 Justerade värden för parametrar i beräkningsmetoden för Rullbandsmodellen

Parameter	Storlek
L ; bandet/kanalens längd	15m
b ; bandet/kanalens bredd	2m
h ; kanalens höjd	0,3m
v ; Lufthastighet	8m/s
A ; kanalens tvärsnittsarea	$(2\text{m} \times 0,3\text{m}) = 0,6\text{m}^2$
v_f ; lufthastighet vid fläktens utlopp	8m/s

3.4 Torkningsmetoders lönsamhet ur ett transportperspektiv

Vid bedömning av torkningsprocessers lönsamhet ur ett transportperspektiv är tre faktorer avgörande: materialets vatteninnehåll, transportkostnader och energiförbrukning. Ett högt vatteninnehåll ökar både vikten och volymen och därmed transportkostnaden, medan en effektiv torkningsmetod kan minska vikten och sänka dessa kostnader. Transportsträckans längd påverkar också lönsamheten, där längre avstånd gör torkning mer fördelaktig. Samtidigt kräver olika torkningsmetoder varierande mängder energi, vilket påverkar den totala ekonomin i processen. Figur 13 illustrerar hur volymen ändras beroende på materialets TS-halt. Där det initiala materialet (till vänster) har en TS-halt på 35% och det torkade materialet (till höger) över 90% TS-halt. Baserat på figuren kan volymen och vikten antas minska i samma takt och vara proportionellt beroende av varandra.



Figur 13 illustrerar hur volymen beror av TS--halten

För att analysera detta tas en formel fram som jämför energiförbrukningen för torkningsprocessen med de transportbesparingar som uppnås genom viktminskning. Formeln

bygger på skillnaden mellan den energi som krävs för att torka materialet och den minskade transportkostnaden till följd av lägre vikt, formel (11). Eftersom formeln hanterar två olika energienheter och fokus ligger på lönsamhet, konverteras enheterna till valuta.

Energikostnader och transportpriser behandlas som variabler i beräkningen, vilket möjliggör en analys av hur dessa faktorer påverkar processens ekonomiska fördelar.

$$\text{Lönsamhet} = \text{Transportbesparing} - \text{Energianvändning} \quad (11)$$

Energianvändningen beräknas genom att ta metodens energibehov [E] räknat i kWh/ton, och multiplicera det med energipriset kr/kWh [EP], som i detta fall är en variabel i formel (12). Genom att göra det konverteras enheten till kr/ton.

$$\text{Energianvändning} = E \times EP \quad (12)$$

Transportbesparingar kan i sin tur definieras som skillnaden på transportkostnader innan [TK1] och efter [TK2] behandling, formel (13).

$$\text{Transportbesparingar} = TK1 - TK2 \quad (13)$$

Transportkostnaderna är i verkligheten också en variabel och beror på både dieselpris och transportsträcka, men då företaget Sortera använder sig av externa transportfirmor räknas transportpriset till ca. 1100kr/timme/lastbil (Waldenstedt, 2025). För att konvertera detta till kr/ton multipliceras detta med variabeln transporttid [Tt] och sedan divideras det med 36 då det är i snitt 36 ton per lastbil, detta illustreras med formel (14).

$$TK1 = \frac{1100 \times Tt}{36} \quad (14)$$

Transportkostnaden efter behandlingen definieras som: transportkostnaden innan behandling [TK1] multiplicerat med den procentuella viktreduktionen på grund av torkningsprocessen [Pm], detta illustreras med formel (15).

$$TK2 = TK1 \times Pm \quad (15)$$

Den procentuella viktredaktionen till följd av torkningsprocessen [Pm] definieras som skillnaden i massan hos ett bestämt material med en bestämd volym före [mf] och efter [me] torkningen, formel (16).

$$Pm = 1 - \frac{me}{mf} \quad (16)$$

Den fullständiga formeln beskriver lönsamheten i kr/ton och består av 3 variabler:

Transporttiden [Tt], den procentuella viktredaktionen till följd av torkningsprocessen [Pm] och energipriset kr/kWh [EP], formel (17)

$$\text{Lönsamhet} = \frac{1100 \times Tt}{36} (1 - Pm) - E \times EP \quad (17)$$

3.5 Miljöfördelar med Alternativa Slambehandlingsmetoder

De potentiella miljöfördelarna med alternativa slambehandlingsmetoder jämfördes med Sorteras nuvarande behandlingsmetod för materialet. I analysen inkluderades beräkningar av besparingar inom CO₂-utsläpp på grund av minskad transport.

Dessa faktorer beaktas för att uppskatta hur de alternativa torkningsmetoderna kan minska miljöpåverkan och effektivisera processen ur ett CO₂-perspektiv. Eftersom transportsträckorna är okända uttrycks minskningen av CO₂-utsläpp i procent. Detta val motiveras även av att transportsträckorna förblir oförändrade oavsett torkningsmetod – endast antalet transporter påverkas.

Den procentuella viktredaktionen [Pm], definierad i formel (16), representerar även den procentuella minskningen av CO₂-utsläpp från transport. Om vikten exempelvis minskar med 80 %, innebär det att endast 20 % av den ursprungliga materialvikten transporteras, vilket resulterar i att transportbehovet och därmed CO₂-utsläppen reduceras med 80 %.

4. Resultat

I detta avsnitt presenteras resultat från olika tolkningsmetoder och jämföra dessa mot Siccums nya torkningsteknik. Resultaten i detta arbete baseras dels på egna laborationer och dels på försök utförda av Siccum vid deras anläggning. Arbetet syftar till att jämföra energiförbrukning och förändringar i TS-halt över tid.

Utöver dessa tekniska parametrar behandlas även andra relevanta aspekter såsom miljömässiga fördelar, den totala energianvändningen i processen samt lönsamheten ur ett transportperspektiv. Syftet med detta är att avgöra om den nya, innovativa processen är tillräckligt effektiv.

4.1 Torkningsteknikernas effektivitet

I undersökningen av torkningsteknikernas effektivitet samlades data in för att analysera hur snabbt och effektivt varje teknik avlägsnade vatten från materialet, uttryckt som förändring i TS-halt över tid. Det är dock viktigt att beakta att de olika torkmetoderna bygger på skilda principer: container- och rullbandslösningen är yt-bundna processer, medan Siccums frysseparationsteknik är volym- eller materialbaserad. På grund av dessa skillnader är de beräknade torktiderna i detta kapitel att betrakta som uppskattningar snarare än exakta jämförelser under identiska förutsättningar.

4.1.1 Siccums effektivitet

Dessa försök har gjorts på Siccums anläggning i Pajala. Slutprodukten (det torkade materialet) skickades direkt tillbaka till Göteborg för tester av TS-halt. Detta gjordes med hjälp av direktuppvärmningsmetoden. Resultaten av TS-halten presenteras nedan i tabell 5.

Tabell 5 viktförändringar före och efter torkning samt TS-halten med avseende på tid för Siccums process

vikt innan (gram)	vikt efter	tid (h)	ts-halt
100	35	0	35%
53	25	1,5	47%
126	119	3	94%

4.1.2 Passiv och aktiv torkningseffektivitet

Torkningseffektiviteten för den passiva och aktiva lufttorkningen presenteras i tabell 6 och tabell 7, där mängden avlägsnat vatten och motsvarande torkningstider jämförs för respektive teknik. Den aktiva torkningen redovisas separat för två olika luftflödesförhållanden: containermetoden med en lufthastighet på 1 m/s och rullbandsmetoden med en lufthastighet på 8 m/s.

Tabell 6 beskriver viktförändringar före och efter torkning samt ts-halten med avseende på tid för passiv lufttorkningsprocessen.

vikt innan (gram)	vikt efter	tid (h)	ts-halt
100	35	0	35%
100	51	24	51%
113	91	48	81%

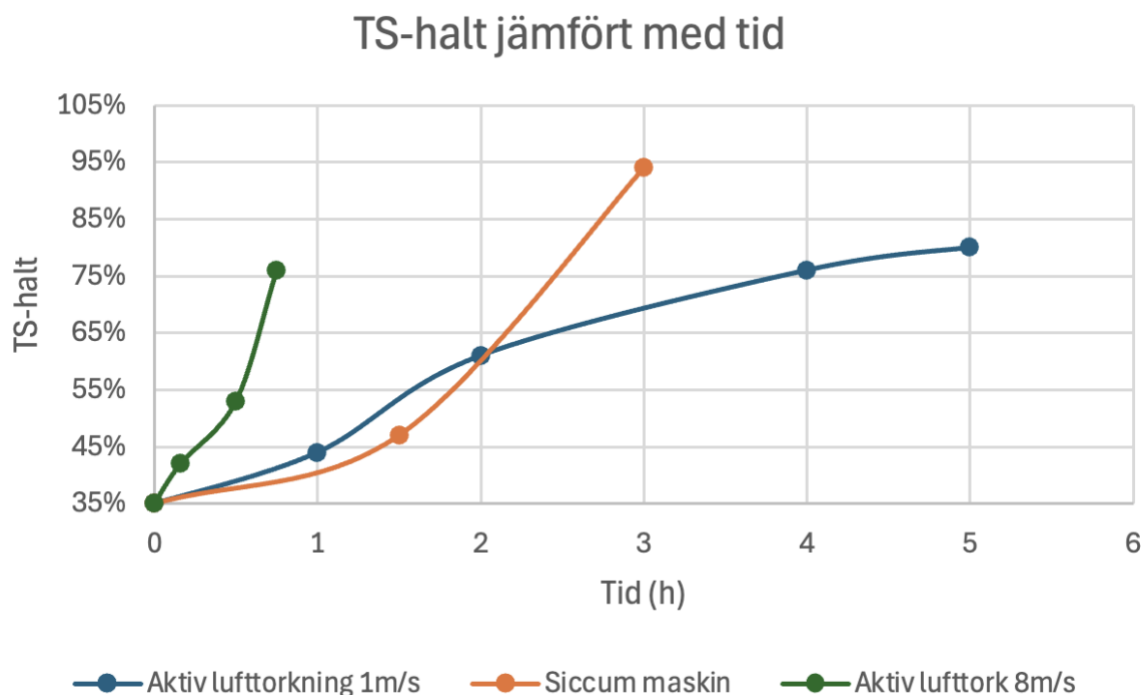
Tabell 7 viktförändringar före och efter torkning samt TS-halten med avseende på tid för aktiv lufttorkningsprocessen med både vindflöde på 1 och 8m/s.

vikt innan (gram)	vikt efter	tid (h)	ts-halt
Test med 1m/s			
100	35	0	35%
39	17	1	44%
21	13	2	62%
21	16	4	76%
20	17	5	85%
Test med 8m/s			
100	35	0	35%
38	16	0,16	42%
32	17	0,5	53%
17	13	0,75	76%

4.1.3 Sammanfattning av effektiviteten

För att sammanfatta effektiviteten hos de tre torkningsteknikerna presenteras en graf som visar förändringen i TS-halt över tid för aktiv lufttorkning med två olika lufthastigheter samt för Siccums maskin (figur 14). Resultaten visar att aktiv lufttorkning med 8 m/s luftflöde är den snabbaste metoden, där materialet når över 75 % TS-halt på under en timme. Siccums maskin visar en ökning i TS-halt och når över 90% efter tre timmar. Aktiv lufttorkning med 1 m/s är däremot långsammare, men visar en stabil och kontinuerlig ökning upp till 80 % TS-halt efter fem timmar. Skillnaderna i resultat belyser främst hur luftflödets hastighet påverkar torkningsförmågan för de aktiva lufttorkningsprocesserna.

Orsaken till att TS-halten i rullbandsmodellen inte uppmättes över 76 % var att materialet blev så torrt att det började flagna, och den höga lufthastigheten gjorde att delar av materialet blåste bort.



Figur 14 en jämförelse på de tre olika torkningsmetoderna och hur TS halten förändras med avseende på tiden

4.2 Energikrävande processer

Detta avsnitt redogör för energibehovet hos tre olika tekniker för torkning och behandling av slam: frysseparationsteknik, nuvarande hanteringsmetod samt aktiv lufttorkning. För varje metod beskrivs hur energiförbrukningen relaterar till faktorer som driftstid, materialhantering och uppnådd torrsbstanshalt. Avsnittet innehåller även jämförande grafer som tydliggör hur energibehovet förändras beroende på processens utformning och mål.

4.2.1 Energikrav för Siccums frysseparationsteknik

Siccums frysseparationsprocess har en effektförbrukning 134 Wh för att torka 1,5kg material. Utifrån dessa data beräknades energiförbrukningen till 89,3 kWh per ton. För detaljer kring beräkningen, se bilaga 1.

4.2.2 Sorteras nuvarande metod

Sorteras nuvarande process för sortering och behandling av slam förbrukar cirka 4060 kWh per dag vid hantering av 1000 ton slam, vilket motsvarar en energiförbrukning på 4,06 kWh/ton. Det är dock viktigt att tydliggöra att denna energi inte utgörs av elförbrukning,

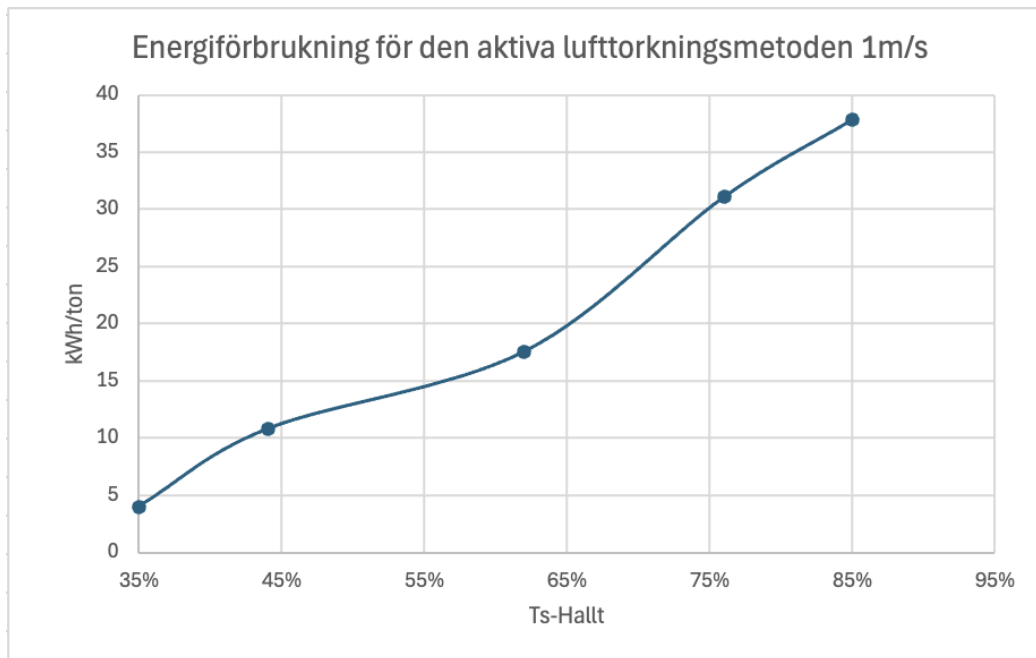
utan baseras på användningen av hjullastare som drivs med diesel. Den angivna energiförbrukningen har därför beräknats genom att konvertera den dagliga dieselanvändningen (408 liter per dag) till ett kWh-värde per ton behandlat material.

4.2.3 Aktiv lufttorkning

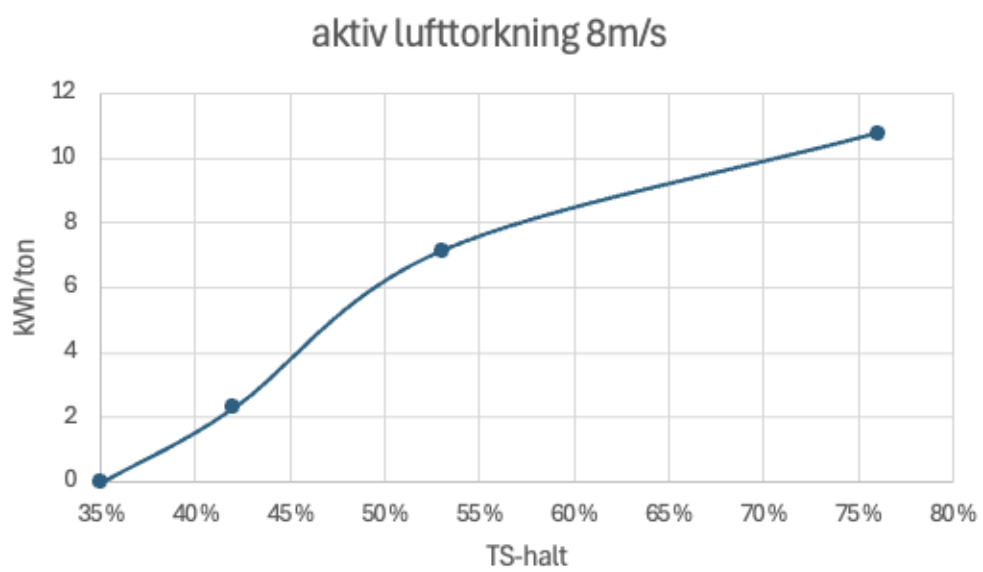
Baserat på de antaganden och beräkningar som redovisats i metodavsnittet har det teoretiska energiåtgången för aktiv lufttorkning för både 1m/s och 8m/s uppskattats. För Containermetoden (1m/s) visar att fläktens effektbehov uppgår till cirka 6.76 kW, vilket motsvarar den effekt som krävs för att transportera luft genom containerns tvärsnittsytta med den specificerade lufthastigheten och det beräknade tryckfallet, se bilaga (2) för uträkning. För att uppskatta det totala energibehovet för torkningsmetoden har även energibehovet för materialhantering, i form av att sprida ut materialet i flera skikt, adderats. Detta motsvarar cirka 4,06 kWh per ton material.

För Rullbandsmetoden (8m/s) uppgår energibehovet till 0,431kW (se bilaga 3), detta motsvarar endast den energi som krävs för att driva fläkten som torkar.

Det totala energibehovet i kWh per ton kommer dock att variera beroende på hur lång tid processerna behöver vara i drift, vilket i sin tur påverkas av önskad slutlig torrsustanshalt. Ju torrare material som eftersträvas, desto längre drifttid krävs och därmed ökar energiförbrukningen. Av denna anledning presenteras det totala energibehovet (kWh/ton) i två separata grafer: den första för Containermetoden (figur 16) och den andra för Rullbandsmetoden (figur 17).



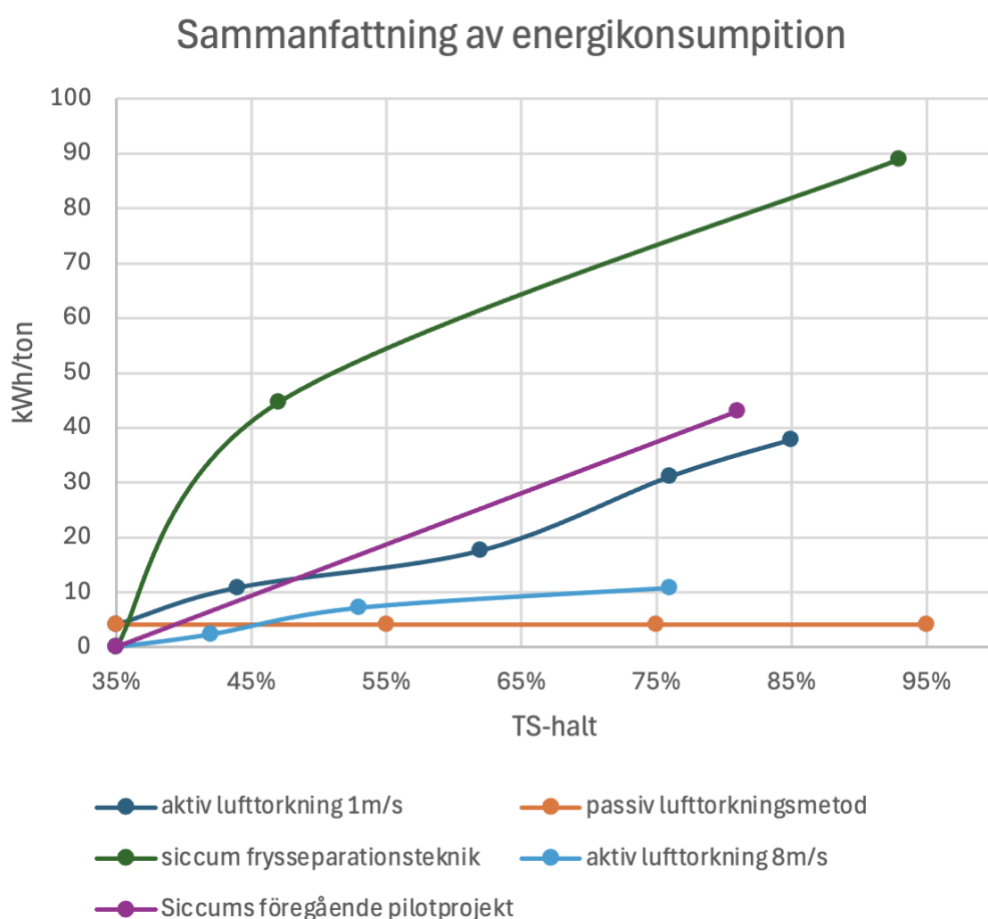
Figur 15 Energiförbrukning för den aktiva lufttorknings metoden 1m/s med avseende på TS-halt



Figur 16 Energiförbrukning för den aktiva lufttorknings metoden 8m/s med avseende på TS-halt

4.2.4 Sammanfattning av energiåtgången för de olika processerna

För att sammanfatta illustrerar diagrammet (figur 18) energiförbrukningen per ton för olika torkningsmetoder i förhållande till TS-halt. Den passiva lufttorkningsmetoden (orange linje) uppvisar en konstant och låg energiförbrukning över hela spannet, då ingen extern energi tillförs. Den metod som visar den kraftigaste ökningen i energiåtgång är Siccums fryssparationsteknik (grön linje), där förbrukningen stiger brant med ökande TS-halt och når upp till cirka 90 kWh/ton vid 85 % TS. Aktiv lufttorkning vid 1 m/s (mörkblå linje) och 8 m/s (ljusblå linje) visar båda ökande energibehov, där 1 m/s kräver mer energi än 8 m/s vid högre TS-halter. Det har valts att i jämförelsen även ta med ett pilotprojekt som gjorts på en frysseparationsmaskin från Siccum (lila linje), (WSP 2022).



Figur 17 energikonsumtion med avseende på torrsubstanshalt för de olika processerna.

4.3 Lönsamhet ur ett transportperspektiv

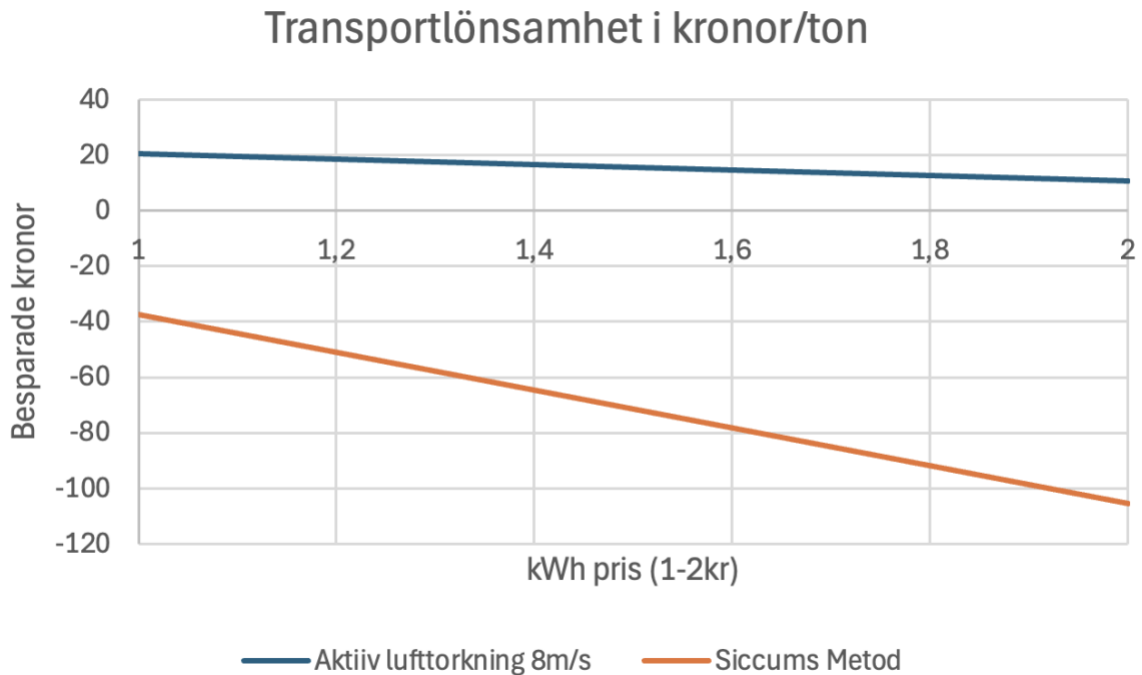
Lönsamheten baseras på formel 17 där flera avgörande faktorer kommer till användning:

Tabell avgörande faktorer för beräkning av lönsamheten ur ett transportperspektiv

Spotpriset el (Göteborg), EP	$EP \in [1,2]$ Kr/kWh
Transporttiden, Tt	2 timmar
Procentuella viktredaktionen (även volymreduktion), Pm	0,5 (detta sker vid 70% TS-halt för det testade materialet)
Torkningsprocessen Energibehov, E	10 kWh/ton (för aktiv lufttorkning 8m/s 68 kWh/ton (för Siccums frysseparationsteknik)

$$\text{Lönsamhet} = \frac{1100 \times Tt}{36} (1 - Pm) - E \times EP$$

Här varierar lönsamheten beroende på hur mycket spotpriset för el ligger på i Göteborg i exemplet nedan ligger det på mellan 1–2 kr/kWh. Men även för hur lång transporttiden är för materialet så vart det kommer ifrån och vart det ska efter behandling på sorteringsanläggning där Tt ligger på 2 timmar. Sedan ligger Pm på 0,5 vilket är den procentuella viktredaktionen vid en TS-halt på 70% vilket framtog från mätningar. Grafen på figur 18 beskriver transportlönsamheten för både den aktiva lufttorkningsprocessen (8m/s) och Siccums frysseparationsteknik. Skillnaden mellan transportlönsamheten för de 2 metoderna beror endast på metodernas energibehov.



Figur 18 transportlönsamheten i kronor per/ton baserat på spotpris Göteborg

Vid ett elpris på 1 kr/kWh uppgår lönsamheten till cirka 20 kr per ton för den aktiva lufttorkningsprocessen och en förlust på 38kr per ton för Siccums metod. I det mest ogynnsamma scenariot kan förlusten bli upp till 105 kr per ton, detta för Siccums metod med ett elpris på 2kr/kWh. Värt att ha i åtanke att det är många faktorer som spelar en avgörande roll angående lönsamheten utöver energipriset.

4.4 Miljöfördelar med alternativa torkningstekniker

En stor miljöfördel med alternativa torkningsmetoder är att materialets vikt minskar avsevärt, vilket i sin tur leder till betydligt lägre koldioxidutsläpp vid transport och hantering. Inte enbart utsläppen från lastbilarna som kör slammet till anläggningen och vidare till deponierna men även hjullastarna som i Siccums process inte kommer att användas. Vilket också kommer att minska koldioxidutsläppen för hanteringen, till exempel om vikten och volymen halveras kommer även koldioxidutsläppen att halveras.

Ett resultat av att dessa alternativa torkningsmetoder får bort vatten från materialet vilket leder till att det kommer att deponeras mindre mängd material beroende på den uppnådda Ts-halten. Den miljömässiga fördelen av torkmetoderna är att mindre mängd material behöver deponeras.

5. Diskussion

I detta kapitel diskuteras studiens resultat i relation till torkningsmetodernas praktiska tillämpning, energieffektivitet, miljöpåverkan och ekonomiska konsekvenser. Fokus ligger på att tolka vad resultaten innebär i ett större sammanhang och identifiera såväl styrkor som begränsningar med respektive teknik.

5.1 Sammanfattning av resultaten

Denna studie har jämfört tre torkningsmetoder för slam: passiv lufttorkning, aktiv lufttorkning och frysseparation med Siccums teknik. Resultaten visar tydligt att varje metod har olika fördelar och begränsningar beroende på vilket kriterium som prioriteras; energiförbrukning, areakapacitet, torktid eller behandlingskapacitet.

Passiv lufttorkning är den metod som kräver minst energi. Den är enkel att genomföra och lämpar sig särskilt väl i situationer där det finns gott om utrymme och tid. Nackdelen är den långa torktiden och det stora platsbehovet, vilket gör den mindre attraktiv i storskaliga eller urbana sammanhang.

Aktiv lufttorkning erbjuder en snabbare process men kräver betydligt mer energi. Resultaten visar att energiförbrukningen ökar i takt med önskad TS-halt, och att variationer i luftflöde påverkar både torkhastighet och energibehov. Metoden har dock fördelen att vara relativt flexibel och kan anpassas efter tillgänglig yta genom olika tekniska lösningar.

Siccums frysseparationsteknik uppvisade den högsta energiförbrukningen av samtliga metoder i studien, med ett värde kring 90 kWh/ton. Detta innebär att tekniken inte är konkurrenskraftig ur energiperspektiv i jämförelse med lufttorkningsmetoder. Däremot visar resultaten att tekniken har en mycket hög kapacitet att behandla stora volymer material, vilket

gör den särskilt intressant för verksamheter med höga inflöden och behov av automatiserad, kontinuerlig drift.

Till skillnad från lufttorkningsmetoder som bygger på utspridning i skikt behandlar frysseparation hela materialvolymen i ett slutet flöde. Detta ger en annan typ av processflöde som kan skalas och automatiseras på ett sätt som är svårt att uppnå med ytbundna torkningsmetoder. I sammanhang där kapacitet och processkontroll väger tyngre än låg energiförbrukning kan därför tekniken vara relevant, trots sin höga energikostnad. Det är också viktigt att notera att de praktiska testerna genomfördes på en liten pilotmaskin. Testvärden så som energikonsumtion och andra processrelaterade värden kan skilja sig åt.

Resultaten tyder på att frysseparationen har ett tydligt användningsområde där hög genomströmning och automatisering prioriteras, även om det sker till priset av hög energiförbrukning. I verksamheter där elpriset är lågt, eller där energikostnaderna vägs upp av logistikvinster och minskad deponering och deponeringskostnader, kan tekniken ändå vara ekonomiskt försvarbar. Särskilt om man beaktar miljömässiga vinster i form av minskat transport och yt-behov samt mindre avfallsmassa.

Samtidigt blir det uppenbart att valet av teknik beror på verksamhetens förutsättningar. Passiv torkning kan vara utmärkt i lågenergisammanhang med gott om yta. Aktiv torkning är snabbare men dyrare. Frysseparation kräver mycket energi men ger också hög kapacitet, processkontroll och potential för industriell integration.

Det är därför inte möjligt att utse en entydigt "bästa" metod utan snarare måste varje teknik bedömas utifrån ett helhetsperspektiv som väger in ekonomi, logistik, yta, miljö och driftkrav.

5.2 Implikationer

Resultaten har flera viktiga implikationer för både branschen och fortsatt utveckling av torkningstekniker. För det första visar det att nyare metoder som Siccums frysseparation kan vara ett attraktivt alternativ för företag som vill minska sin miljöpåverkan och samtidigt öka effektiviteten i sina processer. Den högre TS-halten innebär mindre vatteninnehåll och därmed lägre transportvolym och kostnader.

Däremot visar våra beräkningar att energikostnaderna snabbt kan bli en avgörande faktor, särskilt vid högre elpriser. Detta pekar på ett praktiskt dilemma för branschen: tekniker som är bra för miljön och tekniskt effektiva kan ändå bli ekonomiskt osäkra om energipriserna är volatila.

För slamhanteringsföretag, som Sortera, kan detta vara avgörande. Det är rimligt att de kommer att väga fördelar som minskade utsläpp, besparingar på deponikostnader och förbättrad hantering mot nackdelar som högre initiala kostnader och energibehov. På teoretisk nivå visar resultaten också att det finns utrymme för vidareutveckling av processer som kombinerar låg energiförbrukning med hög TS-halt, något som idag inte riktigt uppnås fullt ut av någon av de analyserade metoderna.

5.3 Begränsningar

Trots intressanta resultat finns det flera begränsningar i studien. En viktig begränsning är att energidata för Siccums metod, kommer från företaget själv. Även om dessa data är användbara och troligtvis pålitliga, hade det varit mer robust om vi själva kunnat verifiera dem genom egna mätningar. Det är även värt att notera att maskinen Siccum gjort tester på är en mindre variant av den som planeras användas av företaget Sortera.

En annan svaghet är att studien bara inkluderar ett visst antal torkningsmetoder och att förhållandena inte varit exakt likadana för alla tester (t.ex. skillnader i materialmängd, fukttinhåll eller omgivningstemperatur). Detta påverkar jämförbarheten mellan metoderna. Det finns också osäkerhet i vissa ekonomiska antaganden, som dieselpolis och elspotpris, vilket gör att lönsamhetsberäkningarna kan variera beroende på dagsaktuella värden.

Utöver det så är en begränsning av precisionen av våra beräkningar alla antaganden som tagits så som att utblandningen av materialet (sorteras nuvarande metod) kräver lika mycket energi som utspridningen (som krävs av bland annat den passiva torkmetoden).

Dessutom bygger vissa beräkningar, som transportlönsamheten, på förenklade modeller som inte tar hänsyn till alla variabler som kan påverka verklig drift, t.ex. underhåll, investering i ny utrustning eller arbetskostnader.

En viktig aspekt är att Siccums test i Pajala utfördes på en mindre pilotmaskin med låg processvolym, vilket inte är representativt för den fullskaliga anläggning (10 ton/dygn) som Sortera överväger. Detta gör att resultaten gällande energibehov och processtid bör tolkas försiktigt, då en storskalig version av tekniken potentiellt kan ha förbättrad energieffektivitet genom teknisk optimering och bättre flödeshantering.

5.4 Förslag till framtida forskning

För framtida studier vore det värdefullt att göra mer detaljerade livscykelanalyser (LCA) för att undersöka den totala miljöpåverkan från varje metod, från energi- och materialförbrukning till utsläpp och avfall. Detta skulle ge en tydligare bild av vilken teknik som är mest hållbar i längden.

Det skulle också vara intressant att vidareutveckla och testa hybrida system som kombinerar olika tekniker, exempelvis en förbehandling med lufttorkning följt av frysseparation, för att se om man kan uppnå en balans mellan låg energiförbrukning och hög TS-halt.

En annan viktig aspekt vore att undersöka hur känslig den ekonomiska lönsamheten är för olika scenarier, till exempel förändrade elpriser, bränslekostnader eller framtida miljöregler. Detta skulle kunna hjälpa företag att göra bättre och mer hållbara investeringar.

Slutligen skulle fler tester i verklig driftmiljö (inte bara i pilotanläggningar) ge mer realistiska data och kunna visa på utmaningar som inte syns i kontrollerade tester.

6 Slutsatser

6.1 Effektivitet i torkningsprocessen

De tre undersökta metoderna för torkning av slam visar tydliga skillnader i både torkningsprincip och prestanda. Passiv lufttorkning är energieffektiv men långsam och yteffektiviteten är låg. Aktiv lufttorkning ger snabbare resultat men kräver mer energi och noggrann teknisk dimensionering. Siccums frysseparationsteknik uppvisade den högsta energiförbrukningen i studien men har samtidigt störst kapacitet att behandla stora volymer material i ett slutet och kontrollerat flöde. Valet av metod bör därför baseras på verksamhetens krav på torktid, kapacitet, tillgänglig yta och energikostnad.

6.2 Energiförbrukning och hållbarhet

Passiv lufttorkning var mest energieffektiv, följt av aktiv lufttorkning. Siccums metod drog mest energi per ton behandlat material. Det gör att tekniken inte är optimal i situationer där låg energiförbrukning är avgörande. Samtidigt kan tekniken vara hållbar i ett vidare perspektiv, genom att minska behovet av transporter, deponi och manuell hantering. Den långsiktiga hållbarheten bör därför inte enbart bedömas utifrån energibehovet, utan i relation till hela hanteringskedjan.

6.3 Transportfördelar

En viktig slutsats är att slam som behandlats blir betydligt lättare att transportera tack vare den högre TS-halten. Den minskade vikten innebär lägre bränslekostnader och färre transporter, vilket är särskilt viktigt vid längre avstånd. Detta gör metoden fördelaktig ur ett logistiskt och ekonomiskt perspektiv, förutsatt att energikostnaderna hålls på en rimlig nivå.

6.4 Miljöfördelar

Alla tre metoder ger miljövinster genom minskad mängd avfall att transportera och deponera. Den största minskningen i transportrelaterade utsläpp sker när TS-halten är hög, vilket talar för metoder som kan nå dessa nivåer, även om det sker till högre energikostnad. Vilken metod som totalt sett är mest miljövänlig beror därför på balansen mellan energikällor, transportavstånd och materialmängd.

6.5 Sammanfattande slutsats

Siccums frysseparationsteknik är energikrävande, men kan i rätt sammanhang erbjuda betydande fördelar genom hög kapacitet, automatisk drift och minskad avfallsmängd och minskat areabehov. Den lämpar sig särskilt för verksamheter där stora volymer slam ska hanteras snabbt och med hög processkontroll. Den passar däremot sämre i sammanhang där energieffektivitet är avgörande eller där kapaciteten inte behöver vara hög. Studien visar att inget enskilt alternativ är bäst i alla avseenden utan att valet bör göras utifrån en helhetsbedömning av tekniska, ekonomiska och logistiska förutsättningar.

7. Referenser

Cengel, Y. A. & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education.

Encyclopedia Britannica (n.d.) Vapor pressure. Tillgänglig på: www.britannica.com (Hämtad: 22 januari 2025).

Havs- och vattenmyndigheten (2023) Sediment och havsbotten. Tillgänglig på: www.havochvatten.se (Hämtad: 22 januari 2025).

Hörsten, H. (2025). Personlig intervju, 25 februari. [Sortera].

ICES (2023) Havsbotten och marina sediment. Tillgänglig på: www.ices.dk (Hämtad: 22 januari 2025).

Livet i havet, 2024-12-16. Djupa mjuka bottnar. [online] Tillgänglig på: www.havet.nu (Hämtad: 4 februari 2025).

Mujumdar, A.S. (ed.) (2014) Handbook of Industrial Drying. 4th edn. Boca Raton: CRC Press. DOI: [Handbook of Industrial Drying](#).

Nationalencyklopedin (n.d.) Avdunstning. Tillgänglig på: www.ne.se (Hämtad: 22 januari 2025).

NOAA (2023) Studier av sediment och havsbotten. Tillgänglig på: www.gu.se (Hämtad: 22 januari 2025).

Naturskyddsföreningen, 2023. Porlande bäckar och brusande älvar. [pdf] Tillgänglig på: cdn.naturskyddsforeningen.se (Hämtad: 11 februari 2025).

Science AQ, 2023. Typen av havsbotten Sediments. [online] Tillgänglig på: sv.scienceaq.com (Hämtad: 23 januari 2025).

Siccum, 2025, Freeze Dewatering Unit. Tillgänglig vid: www.siccum.se (Hämtad: 22 januari 2025).

SGU, 2022. Ny rapport om bottenföroreningar i Sveriges havsområden. [online] Tillgänglig på: www.sgu.se (Hämtad: 23 januari 2025).

SFS 2001:512, Förordning om deponering av avfall. Stockholm: Sveriges riksdag. Tillgänglig vid: www.riksdagen.se (Hämtad: 22 januari 2025).

SFS 2001:512. Förordning om deponering av avfall. Stockholm: Miljödepartementet. Tillgänglig på: www.riksdagen.se (Hämtad: 10 februari 2025).

Stockholms stad (n.d.). *Beräkningsmodell SCB*. Tillgänglig på: www.stockholm.se (Hämtad: 3 mars 2025).

SFS 2020:614, Avfallsförordning. Stockholm: Sveriges Riksdag. Tillgänglig vid: www.riksdagen.se (Hämtad: 22 januari 2025).

Van't Land, C.M. (2012) *Drying in the Process Industry*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Waldenstedt, T. (2025). **Personlig intervju**, 17 februari. [Sortera].

WSP (2022). Frysavvattning av fibersediment: Pilotprojekt nr 4 inom RUFS, Regeringsuppdrag om ökad kunskap för åtgärder av förorenade sediment. Stockholm: WSP Sverige AB.

White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. 7th ed. New York: McGraw-Hill.

Bilagor

Bilaga 1

Utträkning för extrapolering av energiförbrukning för 1 ton material

Siccums metod:

SICCUM ENERGI FÖRBRUKNING

134 Wh FÖR ATT TORKA 1.5 kg

$$\frac{1000 \text{ kg}}{1.5} = 666.6 \dot{\rightarrow} 134 \text{ Wh} \cdot 666.6 = 89333 \text{ Wh/ton} \rightarrow 89.3 \text{ kWh/ton}$$

Bilaga 2

Aktiv lufttorkning 1m/s:

AKTIV LUFTTORKNING 1 m/s ENERGI FÖRBRUKNING

$$P = \frac{\Delta P \cdot Q}{\eta} \quad (1) \quad Q = A_k \cdot v \quad (2)$$

$$Q = 5 \text{ m} \cdot 6 \text{ m} \cdot 1 \text{ m/s} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta P = \Delta P_{\text{stat}} + \Delta P_{\text{dyn}}$$

$$\Delta P_{\text{dyn}} = \frac{\rho v^2}{2} \rightarrow \frac{1.2 \cdot 1^2}{2} = \underline{\underline{0.6 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta P_{\text{stat}} = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (5) \quad D_h = \frac{4A}{V_0} \rightarrow V_0 = 2(b+h) = 10.6 \text{ m}$$

$$D_h = \frac{4 \cdot 5 \cdot 0.3}{10.6} = \underline{\underline{0.56 \text{ m}}}$$

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{1.2 \cdot 1 \text{ m/s} \cdot 0.56}{1.81 \cdot 10^{-5}} = 37527 > 4000 \rightarrow \text{TURBULENS}$$

$$f = 0.3164 Re^{-0.25} = 0.022$$

$$\Rightarrow \Delta P_{\text{stat}} = 0.022 \cdot \frac{10 \text{ m}}{0.56 \text{ m}} \cdot \frac{1.2 \cdot 1^2}{2} = 0.24 \text{ Pa}$$

$$\Delta P = 0.6 + 0.24 = 0.84 \text{ Pa}$$

$$P = \frac{0.84 \text{ Pa} \cdot 30 \text{ m}^3/\text{s}}{0.6} = \underline{\underline{42 \text{ W}}}$$

Effekten multipliceras med tiden maskinen behöver vara igång för att nå en bestämd TS-halt.

Aktiv lufttorkning 8m/s:

AKTIV LUFTTORKNING 8 m/s ENERGIFÖRBRUKNING

$$Q = 2 \cdot 0.3 \cdot 8 = 4.8 \text{ m}^3/\text{s}$$
$$\Delta P_{\text{dyn}} = \frac{1.2 \cdot 8^2}{2} = 38.4 \text{ Pa}$$
$$\Delta P_{\text{stat}} = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad (5) \quad D_h = \frac{4A}{V_0} \rightarrow V_0 = 2 \cdot (2 + 0.3) = 4.6 \text{ m}$$
$$D_h = \frac{4 \cdot 2 \cdot 0.3}{4.6} = 0.52 \text{ m}$$
$$Re = \frac{1.2 \cdot 8 \text{ m/s} \cdot 0.52}{1.81 \cdot 10^{-5}} = 275801 \rightarrow \text{TURBULENT}$$
$$f = 0.3164 \cdot 275801^{-0.25} = 0.014$$
$$\Delta P_{\text{stat}} = 0.014 \cdot \frac{15}{0.52} \cdot \frac{1.2 \cdot 8^2}{2} = 15.5 \text{ Pa}$$
$$\Delta P = 38.4 + 15.5 = 53.9 \text{ Pa}$$
$$P = \frac{\Delta P \cdot Q}{\eta} = \frac{53.9 \text{ Pa} \cdot 4.8}{0.6} = 431 \text{ W}$$

Effekten multipliceras med processtiden maskinen behöver vara i gång för att nå en bestämd TS-halt.

För Rullbandsmetoden måste även processtiden bestämmas, detta görs genom att beräkna hur många kg/h för bestämda TS-halter metoden kan processa:

AKTIV LUFTTORKNING, RULLBANDSMETOD:

$$\text{TORKYTA: } 2 \text{ m} \cdot 15 \text{ m} = 30 \text{ m}^2 \xrightarrow{1 \text{ kg/m}^2} 30 \text{ kg}$$

TS HALT	TORKTID		TORKTID/1000kg
42%	→ 0.16 h	→ $\frac{1}{0.16} \cdot 45 \text{ kg/h} = 187 \text{ kg/h}$	→ $\frac{1000}{187} = 5.34 \text{ h}$
53%	→ 0.5 h	→ $\frac{1}{0.5} \cdot 45 \text{ kg/h} = 60 \text{ kg/h}$	→ $\frac{1000}{60} = 16.6 \text{ h}$
76%	→ 0.75 h	→ $\frac{1}{0.75} \cdot 45 \text{ kg/h} = 40 \text{ kg/h}$	→ $\frac{1000}{40} = 25 \text{ h}$

Bilaga 3

Intervjufrågor – Thomas Waldenstedt (Sortera AB)

1. Hur har ni planerat upplägget för maskinen?

Maskinen kommer att vara en mindre enhet med lägre kapacitet och anpassad för en mindre operation.

2. Vilka parametrar kommer att kontrolleras på massorna?

De huvudsakliga faktorerna som övervakas är energiförbrukning och torrsubstanshalten (TS-halten).

3. När och hur tas prover?

Prover tas vid förutbestämda tidpunkter under processen. Tiden beror på processtiden och önskad torrhet i materialet.

4. Hur länge kommer maskinen att vara i drift?

Maskinen kommer endast att köras när personal finns på plats.

5. Vilka olika typer av massor kommer att testas?

Alla olika typer av massor som vi kan få tag på kommer att testas, från material med hög TS-halt till de med låg TS-halt.

6. Hur lång tid kommer testerna att pågå?

Testperioden är ännu inte fastställd, men maskinen kommer att köras under en längre tid för att samla tillräckligt med data.

7. När levereras och startas maskinen?

Maskinen anländer nästa vecka och kommer att tas i drift kort därefter. En tre dagars utbildning genomförs innan den sätts i full drift.

Intervjufrågor – Håkan Hörsten (Sortera AB)

1. Hur ser variationen av olika Slam och sediment?

De olika sedimentkategorierna (850, 650, 250) påverkar både processen och prissättningen. Ju högre siffra, desto mer kostsamt och komplicerat är det att hantera.

2. Hur ser de olika kategorierna av mark ut?

Skillnaden mellan KM-känslig mark och de andra kategorierna (MKM, IFA, FA) handlar om markens känslighet för föroreningar och hur material får hanteras på dessa områden. Farligt avfall bedöms genom en noggrann inspektion innan det hanteras. Om det klassas som farligt tar de ut ett högre pris för att täcka extra säkerhetsåtgärder och hantering.

3. Hur mycket material blandas med slammet och sedimentet?

Gips blandas i en liten mängd, vanligtvis inte mer än 10%, för att undvika att materialet blir för rinnande. Om det är gammalt gips, kan blandningen behöva justeras för att säkerställa stabiliteten. Material som klassificeras som sikt eller siktrest bedöms utifrån dess sammansättning och storlek. Det kan innehålla damm, gips och småbitar av trä eller plast.

4. Hur många hjullastare är igång på anläggningen dagligen?

Antalet hjullastare justeras beroende på flödet. Vid mindre flöden används 1–3 hjullastare, men det kan variera beroende på mängden material. Hjullastarna tankas varannan dag, med en kapacitet på 350 liter per tankning. Detta räcker för att hålla igång maskinerna under hela arbetsdagen.

5. Hur många ton processas dagligen?

Antalet lastbilar som används för att transportera material påverkar hur mycket som kan processas. Vanligtvis är det 5 lastbilar, men det kan vara så lite som 1 beroende på flödet.

6. Hur stor mängd material blandas med slammet och hur långa sträckor körs det till deponier?

Max 10% gips blandas för att förhindra att materialet blir för rinnande. Det är en säkerhetsåtgärd för att hålla materialet hanterbart. Borås och Vänersborg är deponier som används beroende på materialets sammansättning och vilka specifika krav som finns på deponeringen. Endast två anläggningar är certifierade för att hantera PFAS på grund av de strikta reglerna och den specialiserade tekniken som krävs för att behandla dessa farliga ämnen.



CHALMERS