EXAMENSARBETE

Undersökning av egenskaper och mekanisk beständighet av hydraulisk återfyll i Renströmgruvan

Joel Sundström

Civilingenjör, Väg- och vattenbyggnad
2024

Luleå tekniska universitet
Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser

LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET

[Denna sida har avsiktligt lämnats tom]

FÖRORD

Detta examensarbete avrundar mina studier inom civilingenjörsprogrammet mot väg- och vattenbyggnad, inriktning mot jord- och bergbyggnad vid Luleå Tekniska Universitet. Arbetet har utförts på New Bolidens vägnar, specifikt teknikavdelningen Gruvor, under perioden juni till december 2024.

Jag vill börja med att tacka min handledare på gruvteknik, Mats Isaksson, samt handledare och examinator från universitetet, Hans Åhlin och Johan Funehag. Tack till Anders Waleij som lyfte projektidén. Jag vill även tacka Nils Kågström, laboranterna på Pilotverket, driftlabbet, driftledningen på G1A samt övriga personer som gjort detta arbete möjligt.
A special thanks to Zlatko Martic & Damir Jokic for an introduction to the world of admixtures!

Joel Sundström
Boliden, december 2024

SAMMANFATTNING

Gruvorna i Bolidenområdet kan idag bara använda anrikningssand som faller av Kristinebergsmalmen för hydraulisk återfyllning. Detta är främst kopplat till kornstorleksfördelning och permeabiliteten på övriga malmer som anrikas. Brytningen i Kristinebergsgruvan är nu i slutfasen, samtidigt som Rävlidenfyndigheten börjar tas i produktion. Sandmagasinet för Bolidenområdet, Hötjärn, har idag en förväntad livslängd till 2028. Den primära frågeställningen för detta examensarbete har varit att undersöka om det är möjligt att använda Rävlidensanden till hydraulisk återfyll. På detta sätt kan man återföra delar av avfallet till gruvan och förlänga livslängden för Hötjärnsmagasinet.

Syftet med detta arbete har varit att utvärdera materialparametrar och beständighet kring hydraulisk återfyllnad i Renströmsgruvan. Mer specifikt kommer materialparametrar såsom kornstorleksfördelning, densitet och permeabilitet att undersökas. Laboratorietester såsom flytbarhet, viskositet, enaxiell tryckhållfasthet och segregationstest kommer också att utföras. Arbete har fokuserats på de tekniska aspekterna bakom hydraulisk återfyllning och mindre på ekonomiska och miljömässiga faktorer.

Resultatet indikerar att cykloniserad Rävlidensand har god potential till att ersätta Kristinebergssanden som primär återfyllnadssand i Bolidenområdet. Sanden passerade krav på materialparametrar såsom kornstorleksfördelning och permeabilitet. Densiteten är något lägre än för Kristinebergssanden, vilket kan komma att förändra driftparametrar. Laboratorietesterna som utförts visar på likheter i viskositet för Rävlidensanden jämfört med Kristinebergssanden. Med tillsatsmedel är det möjligt att förändra flytegenskaper och sedimenteringsprocessen för hydraulisk återfyllnad. Rävlidenproven visade högre hållfasthet än samma försöksuppställning för Kristinebergsproven, ofta långt över hållfasthetskraven som företaget ställer på sin återfyllning. Resultaten tyder på att en optimering av recept är möjlig givet att laboratorieresultaten går att upprepa i fyllningsrummen.

Samtidigt som laboratorietester indikerar på att Rävlidensanden är en möjlig ersättning till Kristinebergssanden, kvarstår en del frågor innan en definitiv rekommendation kan ges. Frågor att utreda vidare är om sanden fungerar i anläggningen och i rörsystemet, vilket ett fullskaligt test skulle kunna svara på. En annan fråga att undersöka är om avfallssanden som låg till grund för denna rapport är möjlig att återskapa kontinuerligt, eller om geologin kommer förändras framöver.

ABSTRACT

Mines in the Boliden Area can today only use tailing sand from the Kristineberg ore for hydraulic backfill. This is primarily related to particle size distribution and permeability of the other ores being concentrated. The Kristineberg mine is now in its final stages, meanwhile the Rävliden deposit is starting to be put into production. The tailings dam for the Boliden Area, Hötjärn, currently has an expected lifespan until 2028. The primary question for this thesis has been to investigate whether it is possible to use Rävliden sand for hydraulic backfilling. This way, parts of the tailings can be returned to the mine and thus extend the lifespan of the Hötjärn tailing dam.

The purpose of this work has been to evaluate material parameters and durability regarding hydraulic backfilling at the Renström mine. More specifically, material parameters such as grain size distribution, density, and permeability will be examined. Laboratory tests such as flowability, viscosity, uniaxial compressive strength, and segregation tests will also be conducted. The work has focused on the technical aspects of hydraulic backfilling, with less emphasis on economic and environmental factors.

The results indicate that cyclonized Rävliden sand has good potential to replace Kristineberg sand as the primary backfill sand in the Boliden area. The sand met requirements regarding material parameters, such as particle size distribution and permeability. The density is slightly lower than that of Kristineberg sand, which could change operational parameters. The laboratory tests performed show similarities in viscosity for Rävliden sand compared to Kristineberg sand. With admixtures, it is possible to alter the flow properties and sedimentation process for hydraulic backfilling. The Rävliden samples showed higher strength than the same test setup for Kristineberg samples, often far exceeding the strength requirements set by the company for their backfilling. The results suggest that an optimization of the mix is possible, given that the laboratory results can be repeated in the stopes.

While laboratory tests indicate that Rävliden sand is a possible replacement for Kristineberg sand, some questions remain before a definitive recommendation can be made. Further investigation is needed to determine if the sand works in the facility and in the piping system, which could be answered by a full-scale test. Another issue to explore is whether the waste sand used for this report can be continuously regenerated, or if the geology will change in the future.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1 INLEDNING 1

1.1 BAKGRUND 1

1.1.1 Bolidenområdet 1

1.1.2 Renströmsgruvan 1

1.2 SYFTE, MÅL OCH GENOMFÖRANDE 3

1.3 FRÅGESTÄLLNINGAR 3

1.4 AVGRÄNSNINGAR 3

2 TEORI 5

2.1 IGENSÄTTNINGSBRYTNING OCH ÅTERFYLLNING 5

2.1.1 Hållfasthetskrav 5

2.2 CHF 10

2.2.1 Dränering 10

2.2.2 Segregation 10

2.2.3 Enaxiell tryckhållfasthet 12

2.2.4 Flödesmekanik 12

2.3 KARAKTERISERING AV ANRIKNINGSSAND 15

2.3.1 Kornstorleksfördelning 15

2.3.2 Densitet 16

2.3.3 Permeabilitet 16

3 METOD 18

3.1 MATERIALPARAMETRAR 18

3.1.1 Kornstorleksfördelning 18

3.1.2 Densitet 19

3.1.3 Fuktkvot 20

3.1.4 Permeabilitet 20

3.2 PROVKROPPSTILLVERKNING 21

3.2.1 Enaxiell tryckhållfasthetstest 21

3.2.2 Segregationstest 23

3.3 LABORATORIETESTER 23

3.3.1 Flytbarhet 23

3.3.2 Viskositet 26

3.3.3 Enaxiell tryckhållfasthet 27

3.3.4 Segregationstest....28
4 RESULTAT....31
4.1 MATERIALPARAMETRAR....31
4.1.1 Kornstorleksfördelning....31
4.1.2 Densitet....32
4.1.3 Fuktkvot....32
4.1.4 Permeabilitet....33
4.2 LABORATORIETESTER....34
4.2.1 Flytbarhet....34
4.2.2 Viskositet....34
4.2.3 Enaxiell tryckhållfasthetstest....35
4.2.4 Segregationstest....38
5 ANALYS & DISKUSSION....40
5.1 MATERIALPARAMETRAR....40
5.1.1 Kornstorleksfördelning....40
5.1.2 Densitet....40
5.1.3 Fuktkvot....41
5.1.4 Permeabilitet....42
5.2 LABORATORIETESTER....42
5.2.1 Flytbarhet....42
5.2.2 Viskositet....44
5.2.3 Enaxiell tryckhållfasthetstest....45
5.2.4 Segregationstest....48
6 SLUTSATS....50
6.1 VIDARE STUDIER....51
7 REFERENSER....53
8 APPENDIX....56
8.1 APPENDIX A – KORNSTORLEKSFÖRDELNING FRÅN MALVERN....56
8.2 APPENDIX B – DENSITETSRAPPORTER FRÅN ACCUPYC II 1340....59
8.3 APPENDIX C - FUKTKVOTSBERÄKNINGAR....61
8.4 APPENDIX D – PROVTRYCKNINGSDATA....62
8.5 APPENDIX E – MARSHTEST....66

TERMINOLOGI

Backfill	Återfyllning.
B.m.	Bindemedelshalt (%).
Cut-and-fill	Igensättningsbrytning
Dike	Öppning längst in på en skivpall som skjuts först och det losskjutna berget lastas ut. Volymen som skapas ger utrymme för att kunna skjuta ut resterande del av pallen.
Drift-and-fill	Igensättningsbrytning då rummet är uppdelat i flera ”paneler” (längsgående orter). Även kallat panelbrytning.
F.g.	Fastgodsandel (vikt%)
G1A	Anrikningsverket i Boliden.
G1R	Renströmsgruvan.
G2K	Kristinebergsgruvan.
G2R	Rävlidenfyndigheten.
Gråberg	Berg som inte är lönsamt att anrika.
HF/CHF	Hydraulic fill/cemented hydraulic fyll (hydraulisk/cementerad hydraulisk återfyll). Består av sand, vatten och ev. bindemedel.
Inslag	Ort som ger tillträde till brytningsrummet från rampen.
Kampanj	Period där en malmsort går in i Anrikningsverk.
Panelbrytning	Se ”Drift-and-fill”.
PF	Pastefyll (anrikningssand, vatten och ev. bindemedel). Mer trögflytande blandning som måste pumpas genom rörsystem.
PSD	Particle size distribution/kornstorleksfördelning.
RF/CRF	Rock fill/cemented rock fill. Gråbergsfyll/gråbergsfyll blandat med cementslurry.
Skiva	När malmkroppen är uppdelad i flera vertikala nivåer (skivor).
Tunghet	Förhållande mellan tyngd och volym. Definierad som densitet multiplicerat med gravitationskonstant ($\rho * g$).
UCS	Uniaxial compressive strength/enaxiell tryckhållfasthet.
VMA	Viskositetmodifierande tillsatsmedel.

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

1.1.1 Bolidenområdet

Malmbrytning i Bolidenområdet har pågått i ganska precis 100 år och sedan starten har ett 30-tal gruvor varit i drift. Idag är tre gruvor i drift i form av underjordsgruvorna Renström, Kristineberg och Kankberg. Stor del av brytningen består av igensättningsbrytning, borträknat Kankberg som använder sig utav rum-och-pelarbrytning. Vid rum-och pelarbrytning sker återfyllnad enbart med gråberg. Gruvorna i Kristineberg och Renström återfylls till stor del av hydraulisk återfyll, stabiliserad eller ostabiliserad. Vid användning av andra brytningsmetoder än cut-and-fill eller vid andra förutsättningar kan gråbergsfyll eller cementerad gråbergsfyll tillämpas.

I nuläget sker hydraulisk återfyllning endast med avfallssand som faller av Kristinebergsmalmen, på grund av problem kopplade till kornstorlek och permeabilitet för de övriga avfallsandarna från Renströms- och Kankbergsmalm. Malmbrytningen i Kristinebergsfyndigheten är i slutfasen och sandbrist väntas inträffa 2026. I nuläget håller den intilliggande fyndigheten Rävliden på att tas i produktion.

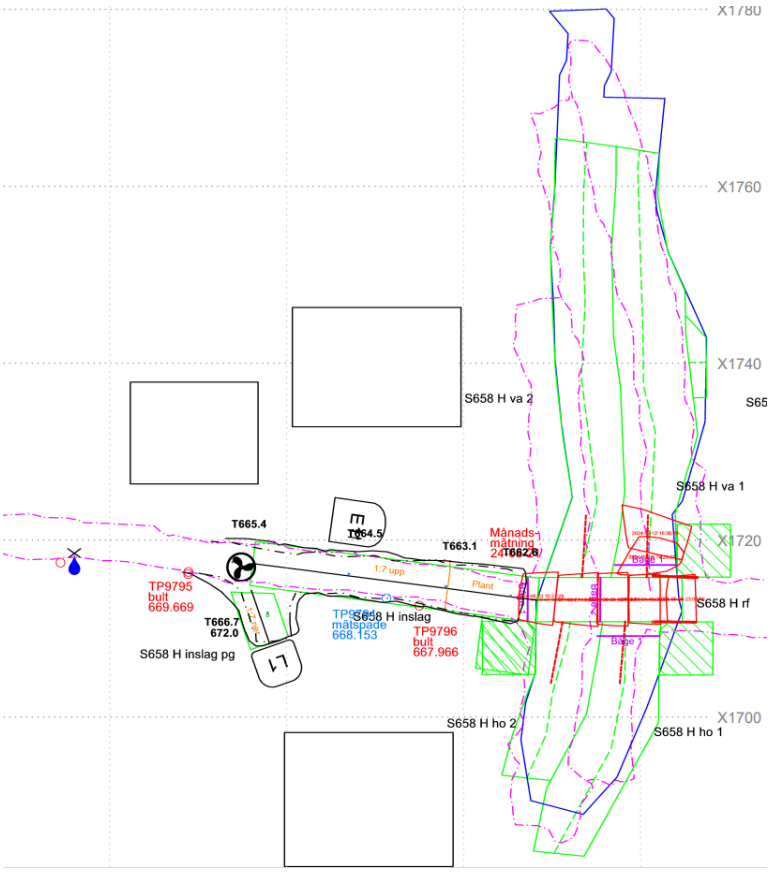
Sandmagasinet, Hötjärn som ligger i närhet till anrikningsverket i Boliden har i nuläget en beräknad livslängd till 2028. Detta är avsevärt kortare än gruvornas planerade livslängd. För att minska deponin till Hötjärnsmagasinet undersöks möjligheten till att använda andra sandmaterial för att ersätta Kristinebergssanden som återfyllnadsmaterial. På detta sätt är det möjligt att fortsatt återföra en del utav avfallssanden till att återfylla färdigbrutna rum, för att spara livslängd på Hötjärnsmagasinet.

1.1.2 Renströmsgruvan

Renströmsgruvan bryter en del av sin malm genom uppåtgående igensättningsbrytning, vanligen cut-and-fill eller drift-and-fill. Metoden lämpar sig väl för branta, lutande och varierande malmkroppar. Brytningsmetoden är småskalig men erbjuder hög selektivitet, låg malmförlust och låg gråbergsinblandning. Vid igensättningsbrytning bryts malmen genom att först driva horisontella orter genom malmkroppen. Orterna återfylls sedan med gråberg, sand eller en blandning av dessa. Därefter fäller man taket från inslaget och börjar bryta uppåtgående mot nästa skiva. Återfyllningen fungerar då som arbetsplattform.

När malmkroppen är bredare än tillåten brytningsbredd tillåter, baserat på bergmekaniska beräkningar tillämpas stabiliserad igensättningsbrytning, även kallat panelbrytning eller drift-

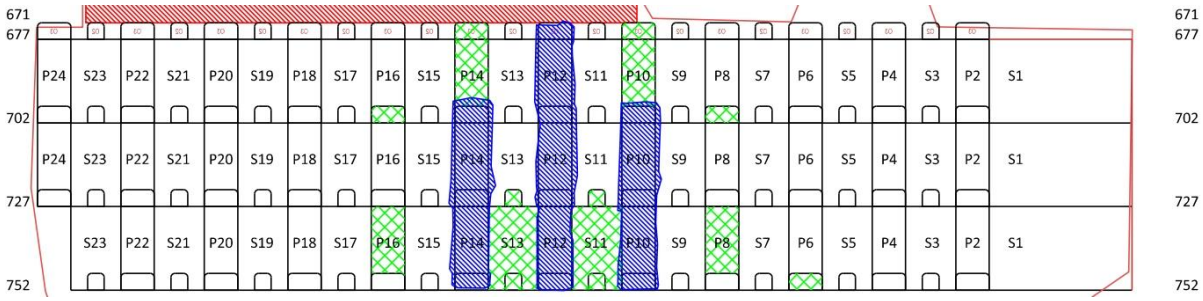
and-fill. Rummet delas då in i paneler, ca 6–7 meter breda som sträcker sig längs hela rummet längd (se exempel i Figur 1 nedan, där panelerna är markerade i ljusgrönt).



Figur 1: Layout, panelbrytning, S658H. Hämtad från Intranet (u.å.2).

När en panel är färdigbruten byggs en fyllvägg och varpå rummet återfylls med stabiliserad hydraulfyll (CHF). Därefter bryter man panelen som ligger intill den återfyllda panelen. När alla paneler är brutna, fäller man taket från inslaget och bryter uppåtgående mot nästa skiva. Precis som för cut-and-fill bidrar då återfyllningen till arbetsplattform på nästa skiva.

En annan brytningsmetod gruvan använder sig utav är tvärgående skivpallsbrytning. Malmen tas ut i pallar, primära eller sekundära som bryts i en förutbestämd ordning. Primärpallarna tas först och återfylls med ett stabiliserat material, antingen CHF, stabiliserad gråbergsfyll (CRF) eller Pastefyll (PF). Sekundärpallarna kan först tas efter att primärpallarna på vardera sida är skjutna och återfyllda. Dessa behöver inte återfyllas med stabiliserat material, utan kan återfyllas av exempelvis hydraulfyll (HF) eller gråberg (RF). Nedan i Figur 2 ses layouten för ett av skivpallsområdena i Renströmsgruvan, där de blåmarkerade är primärpallar som har tagits.



Figur 2: Layout, skivpallsbrytning. Hämtad från Intranet (u.å.1).

Primära syftena med stabiliserad igensättningsbrytning att hjälpa omgivande berg att bära upp sig själv, deponera avfall eller gråberg samt att skapa en arbetsplattform för ovanliggande skiva. Vid tillämpning av hydraulisk återfyll vill man transportera fastgodset (sand och eventuellt bindemedel) med så lite vatten som är hydrauliskt möjligt, med minsta nödvändiga mängd bindemedel och samtidigt framställa en kompetent fyll som motsvarar hållfasthetskraven. Överskottsvatten måste dräneras ut från rummet, omhändertas och renas innan det kan återföras i gruvans vattensystem eller släppas ut i ett vattendrag. Detta tillför naturligtvis en kostnad. I stabiliserad återfyll står bindemedlet för majoriteten av kostnaden, och målet är följaktligen att tillföra så lite som nödvändigt. Samtidigt bör återfyllnaden ses som en säkerhetsfråga, då den fyller en väsentlig del gällande stabiliteten på brytningsrummen.

1.2 Syfte, mål och genomförande

Syftet med detta examensarbete är att undersöka egenskaper och mekanisk beständighet hos CHF i Renströmsgruvan. Vad som kommer undersökas mer specifikt är materialparametrar för avfallssandarna från Kristineberg- och Rävlidenfyndigheten, såsom kornstorleksfördelning, densitet och permeabilitet. Även laboratorieundersökningarna kommer att utföras på dessa sandar, nämligen flytbarhet, viskositet, enaxiell tryckhållfasthet och segregationstest.

1.3 Frågeställningar

Frågeställningar som detta examensarbete siktar mot att svara på är:

- Kan anrikningssand från Rävlidenfyndigheten användas för hydraulisk återfyll i Renströmsgruvan?
- Hur uppnås en optimal stabiliserad hydraulfyll?

1.4 Avgränsningar

- Detta arbete ska omfatta 30 högskolepoäng, vilket i sin tur ska motsvara tidsramen 20 heltidsveckor.

- Rapporten lägger främst vikt på de tekniska aspekterna, mindre för ekonomiska och miljömässiga aspekter.
- Kemiska egenskaper för beståndsdelarna (sand, processvatten, cement, tillsatser) utvärderas inte.
- Referensprov utförs på Kristinebergssand gällande materialparametrar och laboratorieundersökning för att klargöra vad som används i nuläget. Teoretiska värden kommer att nämnas, men största vikten läggs mot aktuella värden för Kristinebergssanden.
- Slutsatser baseras enbart på material funna i detta examensarbete. Övriga aspekter som kan tänkas påverka men inte behandlats diskuteras övergripande.

2 TEORI

Litteratursökning utfördes för att bilda en grundläggande kännedom gällande hydraulisk återfyll och därutöver förenliga aspekter. Teoridelen innehåller både interna och externa källor. Interna källor har undersökts för att se antaganden, riktlinjer och standarder som företaget själva deklarerat. De externa källorna består av vetenskapliga rapporter, artiklar och konferensbidrag inom examensarbetets avgränsningar.

2.1 Igensättningsbrytning och återfyllning

Återfyllning av urbrutna malmrum utförs huvudsakligen av två anledningar; att bli av med restprodukter i form av sand från anrikning eller gråberg från tillredning, eller för att fylla en stabiliserande funktion vid underjordsbrytning (Rankine et al, 2007). Detta kan exempelvis vara att avlasta taket vid panelbrytning. Andra funktioner som återfyllningen bidrar med är stöd för väggarna samt en arbetsplattform för att utvinna ovanliggande malmskivor vid igensättningsbrytning.

Återfyllning kan delas upp i två kategorier; stabiliserad eller ostabiliserad. Som namnen antyder är den huvudsakliga skillnaden mellan metoderna om bindemedel, exempelvis cement, slagg eller flygaska tillsätts eller ej. Stabiliserad återfyll kan exempelvis vara CRF, CHF eller PF. För de ostabiliserade metoderna är två vanligt förekommande alternativ RF eller HF.

2.1.1 Hållfasthetskrav

För att fastställa erforderlig hållfasthet på återfyllnadsmaterialet utgår Boliden från olika dimensioneringsfall beroende på brytningsmetod och dimensioner på rummen. Vid de tillfällen panelbrytning tillämpas, bryter man sig in bredvid återfyllda paneler och exponerar därmed hydraulfyllen långsida. Vid dessa tillfällen har hydraulfyllen ett enaxiellt hållfasthetskrav på sig som motsvarar att den upprätthåller sin egenvikt, samt att panelen är fylld upp till tak. Därmed minskas fria takspannet ovanför brytningsrummen. Återfyllningen har inte någon uppgift att bära last, utan tankegången med återfyllningen är att den ska hjälpa bergmassan ovanför att bära upp sig själv. Hållfasthetskravet är baserad på Mitchells (et al. 1981) formel. Formeln utgår från relationen mellan mothållande och pådrivande krafter som agerar på blocket, vilket ger att säkerhetsfaktorn, F, då definieras som:

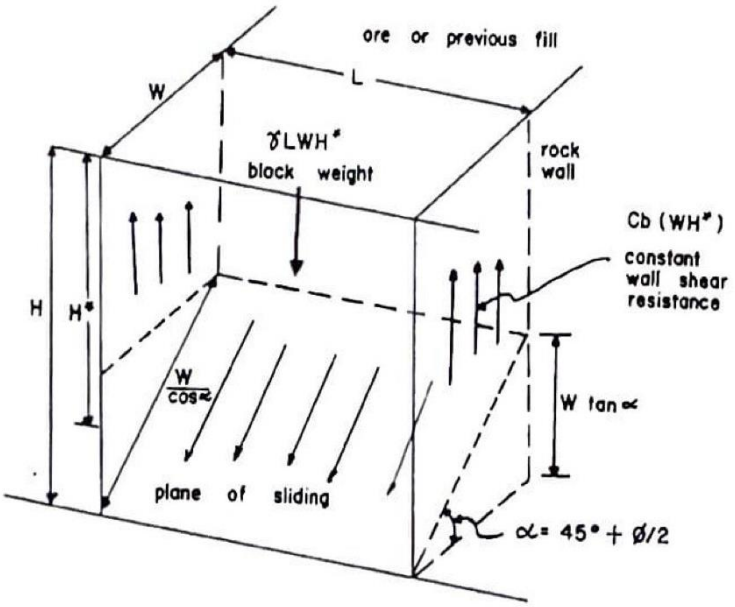
$$F = \frac{\textit{mothållande krafter}}{\textit{pådrivande krafter}}. \tag{1}$$

På sidan som angränsar mot berg motverkas blockets rörelser av skjuvkrafter som agerar mot bergväggen, vilket reducerar nettovikten W_n, av blocket. Denna kraft antas motsvara skjuvhållfastheten inom cementbindningen, C_b. Nettovikten kan då skrivas som:

$$W_n = w * H° * (\gamma * L - 2 * C_b). \quad (2)$$

- γ representerar tungheten (densitet multiplicerat med gravitationskonstant) på återfyllningen i kN/m^3.
- w och L är bredd respektive längd på blocket.
- H° motsvarar den effektiva höjden av blocket, delen som kan utsättas för rörelse längs med glidytan (synlig i Figur 3 nedan) och definieras som:

$$H° = H - \left(w * \frac{\tan(\alpha)}{2}\right), \quad (3)$$



Figur 3: Blockmekanism (från Mitchell et al. 1981)

α motsvarar det kritiska planet:

$$\alpha = 45° + \frac{\phi}{2}. \quad (4)$$

ϕ representerar inre friktionsvinkel för materialet. Därefter kan säkerhetsfaktorn, F, skrivas om genom:

$$F = \frac{W_n * \cos(\alpha) * \tan(\phi) + c * L * \frac{w}{\cos(\alpha)}}{W_n * \sin(\alpha)} = \frac{\tan(\phi)}{\tan(\alpha)} + \frac{2 * c * L * w}{W_n * \sin(2 * \alpha)}. \quad (5)$$

c motsvarar kohesionen längs glidplanet. Vid det förenklande antagandet att skjuvhållfastheten mot bergväggen motsvarar den mobiliserade skjuvhållfastheten i cementbindningen, kan Ekvation (5) ovan med förenklas med hjälp av Ekvation (2) för att beräkna kohesionen som krävs vid scenariot att inre friktionsvinkel motsvarar $\phi = 0°$:

$$F = \frac{\tan(0)}{\tan(45)} + \frac{2 * c * L * w}{W_n * \sin(2 * 45)} = \frac{2 * c * L}{H° * (\gamma * L - 2 * c)}. \quad (5)$$

För att jämvikt ska uppstå mellan mothållande och pådrivande krafter (säkerhetsfaktor F=1) skrivs Ekvation (5) om genom:

$$1 = \frac{2 * c * L}{H° * (\gamma * L - 2 * c)} \rightarrow H° * \gamma * L = 2 * c * (L + H°). \quad (6)$$

Vidare förenkling av Ekvation (6) för att avskilja kohesionsfaktorn följer då som:

$$2 * c = \frac{H° * \gamma * L}{L + H°} = \frac{H° * \gamma}{1 + \frac{H°}{L}}. \quad (7)$$

Därefter definieras enaxiella tryckhållfastheten, σ_c enligt Mohr-Coulombs brottkriterium genom:

$$\sigma_c = \frac{2 * c * \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)} = 2 * c * \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right). \quad (8)$$

Även ekvationen för enaxiell tryckhållfasthet kan förenklas vid scenariot att materialet inte har någon inre friktionsvinkel ($\phi = 0°$), där Ekvation (8) följer som:

$$\sigma_c = \frac{2 * c * \cos(0)}{1 - \sin(0)} = 2 * c * \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{0}{2}\right) = 2 * c. \quad (8)$$

Ekvation (7) skrivs om tillsammans med (8):

$$\sigma_c = 2 * c = \frac{H° * \gamma}{\left(1 + \frac{H°}{L}\right)}. \quad (9)$$

Med tanke på att höjden H är oftast mycket större än bredden w på blocket av återfyllnaden, och för att dimensionera konservativt, reduceras Ekvation (9) ovan slutligen till Mitchells formel:

$$[\sigma_1]_F = \frac{\gamma * H}{\left(1 + \frac{H}{L}\right)}. \quad (10)$$

Enaxiell tryckhållfasthet är enligt Mitchells formel enbart beroende på tunghet hos återfyllnaden, höjd och längd på brytningsrummet. För ett vanligt brytningsrum med längden 30 meter, höjden 6 meter och givet att densiteten på återfyllnaden är 2000 kg/m^3, ger då detta att en erforderlig enaxiell tryckhållfasthet på:

$$[\sigma_1]_F = \frac{2000 * 9{,}81 * 6}{\left(1 + \frac{6}{30}\right)} = 0{,}0981\ MPa. \quad (10)$$

För cementstabiliserad hydraulfyll rekommenderas en säkerhetsfaktor på 2-3 enligt Bergman (2022), vilket i detta fall skulle resultera i en tryckhållfasthet på 0,2-0,3 MPa.

Vid brytning av sekundär skivpallar utgår man från att malmpelaren som ska brytas är upphängd i omgivande återfyll. Vid detta steg är primärrummen på båda sidor sekundärrummet utbrutna och återfyllda med stabiliserad fyll, antingen CHF, CRF eller PF. För att utvinna sekundärpelaren bryts först ”diket” längst in på rummet, för att ge resterande del av pallen utrymme att expandera vid sprängning. Malmgränsen antas vara så distinkt att kontakten ytterst mellan malmen och gråberget kan försummas, och därmed blir sekundärpelaren upphängd av fyllmaterialet på var sida. Dimensioneringskravet i detta fall är att återfyllnadsmaterialet på var sida ska kunna bära upp denna sekundärpelare. Till en början lyder skjuvhållfasthet enligt Mohr-Coulombs brottkriterium som:

$$\tau_s = c + \sigma_n * \tan(\phi). \quad (11)$$

Normalkraften σ_n från malmpelaren på fyllmaterialet försummas i detta läge, det vill säga att kohesionen motsvarar skjuvhållfastheten, $\tau_s = c$. Vikten av malmpelaren som måste bäras upp av kohesionen i fyllblocket på vardera sida följer som:

$$\tau_s = c = \frac{w * \rho * g}{2}. \tag{12}$$

Förenklat kan enaxiell tryckhållfasthet som krävs definieras med hjälp av Ekvation (8) och (12) genom:

$$\sigma_c = \frac{2 * \frac{w * \rho * g}{2} * \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)} = \frac{w * \rho * g * \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)}. \tag{13}$$

Den erforderliga enaxiella tryckhållfastheten för detta dimensioneringsfall är då endast beroende av bredd och densitet på malmpelaren samt friktionsvinkel på glidytan mellan malmpelaren och återfyllnaden. För ett sekundärrum med 15 meters bredd, densitet på 3300 kg/m^3 samt en antagen friktionsvinkel på 35° krävs då en enaxiell tryckhållfasthet (exklusive säkerhetsfaktor) på:

$$\sigma_c = \frac{15 * 3300 * 9{,}81 * \cos(35)}{1 - \sin(35)} = 0{,}933\ MPa. \tag{13}$$

Skivpallsområdena i Renströmsgruvan återfylls idag endast med CRF. Bergman (2022) rekommenderar en säkerhetsfaktor på 2,0 för CRF, 2,0-3,0 för CHF samt över 1,0 för PF. För lastfallet enligt Ekvation 13 skulle detta ge en erforderlig enaxiell tryckhållfasthet på 2,0 MPa för CRF, 2,0-3,0 MPa för CHF samt 1,0 MPa för PF. PF, som exempelvis används i Bolidens gruva i Garpenberg, uppvisar ofta högre hållfasthet in-situ jämfört med laborationsresultat, varvid ingen säkerhets- eller skalfaktor används (Sandström, personlig kommunikation, 20 augusti 2024). Vid tillämpning av PF tillkommer två ytterligare lastfall (Larsson, 2022):

- PF ska binda vattnet i fyllen.
- PF ska fungera som konstruktionsmaterial för att kunna driva ort i vid uttag av mellanskiva.

Det förstnämnda lastfallet inträffar då sekundära skivpallar ska återfyllas. Detta kan göras med gråberg, men PF går att använda för att spara tid. Kravet är att PF ska motstå liquefaction om den blir störd av exempelvis vibrationer från närliggande sprängningar. Fyllmassan tappar då sin skjuvhållfasthet och blir flytande. Kravet på hållfasthet efter 28 dagars härdning är satt till 0,3 MPa. Vid det sistnämnda lastfallet dimensioneras återfyllningen för att vara stabil nog att driva en ort genom för att kunna ta ut mellanskivor. Erforderlig enaxiell tryckhållfasthet för detta fall sätts till 1,5 MPa.

2.2 CHF

2.2.1 Dränering

CHF består av sand, vatten och bindemedel, exempelvis cement och transporteras ut till de urbrutna rummen i slurryform via rör eller borrhål. Vid användning av CHF som återfyllnadsmetod, börjar det fasta godset sedimentera tämligen omgående på rummet (Grice, 1998). Detta separerar vattnet som lägger sig direkt ovanpå hydraulfyllen. Vattnet skall sedan dräneras ut från rummet genom vertikala och/eller horisontella dräneringsrör som ansluter till fyllväggen och lämna fastgodset på rummet.

Fastgodsandelen i slurryn ligger oftast på 65–75 viktprocent (Rankine et al. 2007). Detta innebär att stora mängder vatten följer därmed på rummet för varje timme som återfylls. Utan kompetent dränering riskeras att vatten ställer sig på rummet, vilket bygger upp portrycket och sänker effektivspänningen i fyllningen. Detta ökar lasten som vilar mot fyllväggen. Fyllningen i slurryform ger ett högre tryck på fyllväggen än fyllningen i fast form. En risk med detta är att fyllväggen spricker och börjar läcka, eller helt enkelt kollapsar. Detta innebär risk för personal som uppehåller sig nära väggen.

En annan utmaning vid återfyll med CHF som Martic et al. (2014) tar upp är förlust av bindemedel genom dräneringen. Det är möjligt för de allra finaste cementpartiklarna att följa det dränerade vattnet ut från rummet. Detta ger i sin tur att den tilltänkta andelen bindemedel inte blir enligt recept och hållfastheten i fyllen minskar. Bindemedel utanför fyllrummet kan i sin tur ge problem i gruvans vattensystem samt i reningsprocessen av returvattnet.

2.2.2 Segregation

Ett fenomen som CHF har en tendens att visa är segregation. När återfyllnadssanden deponeras till fyllrummet, startar dränerings- och sedimenteringsprocessen tämligen omgående i materialet. Det relativt häftiga flödet av dräneringsvatten kan bära med sig den finkornigaste sanden till toppen eller botten av rummet (Dalcé et al., 2019). Detta är beroende på

dräneringsuppsättning och flödesriktning av dräneringsvattnet. Heterogeniteten som uppstår i fyllmaterialet kallas segregation, ett exempel i Figur 4 nedan från H1450 Renströmsgruvan. Denna effekt blir eskalerad om dräneringen visar sig bristfällig och en vattenyta samlas ovanpå återfyllnaden. Företeelsen är också vanligt förekommande vid deponering av anrikningssand i sandmagasin, där de grovkorniga partiklarna är mindre flyktbenägna än de finkorniga partiklarna. Detta resulterar i en heterogenitet, eller skiktning inuti sandmagasinet.

Figur 4: Segregering av CHF, Renströmsgruvan

Segregation av återfyllningen, är ett erkänt problem av företaget själva. Vid brytning av intilliggande panel har variationer i stabilitet upptäckts. Detta har bland annat att göra med start och stopp av fyllstationen. Lagerna har olika färg (synligt i Figur 4 ovan) beroende på cementhalt, men hållfasthetsvariationerna kan även undersökas fysiskt. Beroende på cementinnehåll kommer lagerna vara olika hårda. I vissa fall har det förekommit utfall från fyllväggen vid brytning av angränsade paneler, oftast i samband med sprängning i närområdet.

Dalcé (et al., 2019) utförde ett laborationstest som gick ut på att undersöka fenomenet segregation. Stabiliserad hydraulfyll blandades enligt vanligt recept, placerades provrör med

måtten 5 cm i diameter och 10, 20, 40 till uppemot 80 cm i höjd. Proven läts sedan sedimentera i 28 dagar. Enaxiell tryckhållfasthet, kornstorleksfördelning, porositet med mera jämfördes i olika höjder inom provet för att undersöka förekomsten av segregation. Skribenterna definierade graden av segregation (GS) som:

$$GS = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left| D_{50,i} - D_{50,0} \right|}{\sum_{i=1}^{N} \Delta l_i}. \tag{14}$$

- $D_{50,0}$ representerar partikelstorleken där 50% av materialet initialt passerade i sanden.
- $D_{50,i}$ för kornstorleken där 50% av materialet passerar vid höjden i.
- Δl_i står för stegvisa höjdökningen vid i.

2.2.3 Enaxiell tryckhållfasthet

Enaxiell tryckhållfasthet eller Uniaxial Compressional Strength (UCS) är den vanligaste metoden för att undersöka hållfastheten i en stabiliserad fyll. I vissa fall skall fyllmaterialet bidra med mer än bara en arbetsplattform, exempelvis för att avlasta intilliggande paneler och pelare vid panelbrytning. I dessa tillfällen är det önskvärt att få en tämligen enhetlig hållfasthet över hela fyllrummet för att säkerställa arbetsmiljön i brytningsrummet.

Tryckhållfastheten är beroende av en mängd olika parametrar, bland annat typ av fyllmaterial, andel bindemedel, härdningstid, vattencementtal med mera (Saw & Villaescusa, 2013). För en CHF menar Grice (1998) att enaxiell tryckhållfasthet efter 28 dagars härdning och med 6 viktprocent cement inblandat kommer befinna sig över 0,75 MPa. Denna hållfasthet menar författaren kan ökas genom att förlänga härdningstiden eller öka inblandning av bindemedel.

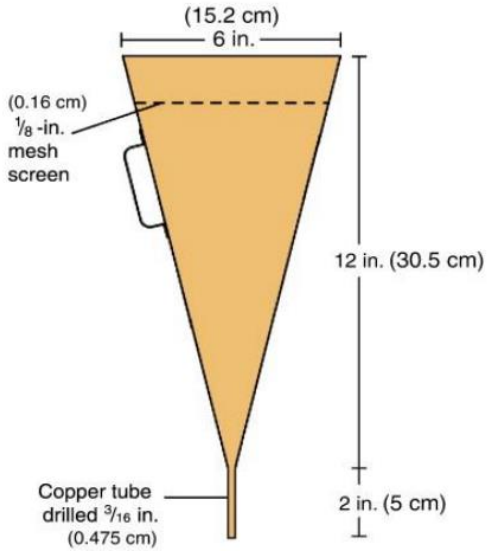
2.2.4 Flödesmekanik

Hydraulisk återfyllning använder vatten som transportmedium från återfyllningsstationen, genom borrhål eller rör fram till brytningsrummet (Yu et al., 2021). Vid design av infrastruktur och mediavägar rörande återfyllnad är det viktigt att undersöka slurryns reologiska parametrar. Dessa kan inkludera flytgräns, skjuvspänning och viskositet.

Olika typer av återfyllnad kan delas upp i två kategorier; newtonska eller icke-newtonska flöden (Rankine et al., 2007). Newtonska flöden uppvisar ett linjärt samband mellan skjuvspänning kontra hastighet, de har alltså ingen flytgräns att övervinna innan materialet visar flytande beteende. Bland dessa typer av återfyllnad ingår CHF/HF.

Vätskor som kräver skjuvspänning för att uppvisa flytande karaktär och har icke-linjära egenskaper och går således under kategorin icke-newtonska vätskor. Ett exempel på en typ av denna återfyllnad är PF (Rankine et al., 2007). PF innehåller en högre andel finkornigt material och har en väsentligt högre fastgodsandel jämfört med hydraulisk fyll. Detta gör den till en trögflytande massa som måste distribueras med högtrycksrör. PF har fördelen att den inte avsätter vatten på fyllrummen och kräver därmed ingen dränering.

Viskositet är en till parameter som påverkar flödesmekaniken för hydraulfyll. Viskositet beskriver flytbarheten i vätskan och går att undersöka med hjälp av exempelvis en reometer. En enklare fältmetod är Marsh viskosimetertest, Figur 5. Uppställningen består av konen samt en uppsamlingsbägare med nivån 1 quart (946 ml) markerad (Mudtest, 2022).



Figur 5: Marshkonens dimensioner (Almahdawi et al., 2014)

Tiden det tar att fylla bägaren till markeringen går att omvandla till μ_e, effektiv dynamisk viskositet i mPa ∗ s, genom ekvationen från Pitt (2000):

$$\mu_e = \rho * (t - 25). \tag{15}$$

- t är tiden i sekunder.
- ρ är densitet på vätskan i g/cm^3.

Fastgodsandel beskriver viktandelen av slurryn som består av sand och bindemedel. Fastgodsandelen varierar självklart från plats till plats och efter förutsättningar, men placerar sig ofta i intervallet från över 50% till över 70% enligt Potvin (et al., 2005, s. 7). Resterande del består av vatten, vars huvudsakliga uppgift i detta stadie är att agera transportmedel för sand och

eventuellt bindemedel. En del av vattnet krävs för hydratiseringen av cementen. Återstående vatten måste dräneras ut från fyllningsrummet för att sedan transporteras till gruvans system för vattenpumpning. Att öka fastgodsandelen menar skribenterna ger en stor fördel i dränerings- och vattenhanteringskostnaderna.

Ett sätt att modifiera egenskaperna i en hydraulfyll är tillsatsmedel. Tillsatsmedel är kemikaliska pulver eller vätskor som finfördelas i vattnet eller i hydraulfyllen i slurryform (Martic et al., 2011). Det finns flera olika funktioner för tillsatsmedel som kan kategoriseras som:

- Vattenreducerare (low-, mid- eller high-range water reducer eller plasticerare). Förbättrar flytegenskaperna i fyll med högre fastgodsandelar.
- Retarders. Fördröjer härdningen i cementen.
- Viskositetsförändrande medel (VMA). Förändrar reologin hos återfyllnaden. Kan förbättra flytegenskapen hos backfillen eller användas som flockningsmedel.
- Acceleratorer. Snabbar på härdningsprocessen i cementen.
- Pumpningshjälpmedel (sättningsförbättrande tillsatsmedel). Förbättrar intern kohesion, homogenitet och sättningsegenskaper i slurryn.

Vilket syfte som eftersträvas vid addering av tillsatsmedel bör vara väl definierat innan försök utförs. Lämpligt tillsatsmedel beror också på

- förutsättningarna vid anläggningen
- kornstorleksfördelning, densitet och mineralogi på sanden
- kemiska sammansättning av vattnet, cementen och sanden.

Tillsatser i återfyllning är ingen ny uppfinning, även om metoden bara användes sporadiskt i början. Redan på 1990-talet visade Martic (et al., 2011) att tillsatser i återfyllning förbättrade egenskaperna av materialet och följaktligen också kostnaden för återfyllning av brytningsrum. Trots framstegen vid inblandning av tillsatser, ökade inte användandet.

En av de mest förklarande orsakerna till detta menar författarna är att under utvecklandet av tillsatser till återfyllnad var att bindemedelspriserna var mycket lägre än nuvarande. Detta gäller framför allt för cement men även slagg och flygaska. Att blanda in tillsatser förblev då en omotiverad metod. Återfyllningens egenskaper, framför allt hållfastheten kunde enkelt förbättras genom att addera högre andel cement, utan att kostnaderna påverkades nämnvärt (Martic et al., 2011).

Idag kan användning av tillsatsmedel för att stärka den härdade återfyllningen eller på annat sätt ändra egenskaperna motiveras på ett helt annat sätt. Bindemedel står i nuläget för mer än 75% av kostnaden för en hydraulisk återfyllning, enligt Kasap et al (2022). Möjligheten att minska andelen bindemedel ger då en stor hävstång för totala kostnaden för återfyll.

2.3 Karakterisering av anrikningssand

2.3.1 Kornstorleksfördelning

För att en anrikningssand skall vara lämplig att användas till hydraulisk återfyllning bör inte mer än 10 viktprocent av partiklarna vara mindre än 10 mikrometer (Dorricott & Grice, 2002; Saw & Villaescusa, 2011; Dalcé et al., 2019). Denna riktlinje ger generellt materialet en permeabilitet som låter sig dräneras i en godtagbar takt. För att uppnå detta kriterium kan sanden behöva cykloniseras för att avlägsna de allra minsta partiklarna. En generell regel är enligt Potvin (et al., 2005, s 67) att den maximala partikelstorleken inte får överskrida 1000 mikrometer för att användas till hydraulfyll. Företaget har själva satt en tumregel på 20% passerande material vid 20 μm för att tillgodose både deponimängd till sandmagasinet samt permeabilitetskrav.

En annan parameter att undersöka är graderingstalet, definierad som kvoten mellan 60% och 10% passerande material:

$$c_u = \frac{D_{60\%}}{D_{10\%}}. \tag{16}$$

Graderingstalet beskriver hur fördelningen mellan finare och grövre partiklar ser ut i sanden. En väl graderad sand i hydraulfyll kan enligt Potvin et al. (2005, s. 13) sänka porositeten, öka densiteten och följaktligen hållfastheten på fyllmaterialet.

I nuläget används som tidigare nämnt bara sand från Kristinebergsmalmen till hydraulisk återfyll. Enligt företaget är Kristinebergsmalmen på grund av sina mineralogiska egenskaper mjukare än övriga malmer. Detta resulterar i att restprodukten efter anrikningen blir grövre, vilket underlättar vid dräneringen av fyllrummen. Tidigare har sandproduktion av Kristinebergssmalmen varit tillräcklig för att försörja både Kristinebergsgruvan och Renströmsgruvan med tillräcklig mängd återfyllnadssand.

Cyklonisering innebär att sandens finaste fraktioner sorteras bort och deponeras på sandmagasinet. Här måste en avvägning göras; samtidigt som målet är att återfylla restmaterialet

i gruvorna fungerar inte en för hög andel finkornigt material hydrauliskt i anläggningen. Risken finns att ledningar sätter igen samt att lågpermeabla sandar kräver längre dräneringstid.

2.3.2 Densitet

Vid en hydraulisk återfyllning är fastgodsandel en av de viktigast styrande parametrarna. Fastgodsandelen definieras som del av totala massan:

$$f.g = \frac{m_{sand} + m_{cement}}{m_{sand} + m_{cement} + m_{vatten} + m_{vatten,\,tillsatt}} * 100\ [\%]. \tag{17}$$

När slurry blandas med sand av lägre densitet, upplevs den tjockare och mer trögflytande än sand av högre densitet vid samma fastgodsandel. Högre andel av volymen i slurryn består då av fast material. Grice (1998) föreslog en fastgodsandel på över 70 viktprocent, eller 45-45 volymprocent. Skribenten menar att det då uppstår en jämvikt mellan överskottsvattnet som behövs för rörtransport minimeras, utan att riskera att rören sätter igen. Potvin et al. (2005, s. 70) definierade en formel för att omvandla volymprocent till viktprocent för en hydraulfyll:

$$\%_{Cw} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{1}{SG * \%_{Cv}}\right) - \left(\frac{1}{SG}\right)\right)}. \tag{18}$$

I Ekvation (18) ovan står

- SG för densitet på sanden i enheten g/cm^3
- $\%_{Cw}$ står för fastgodsandel med avseende på vikt
- $\%_{Cv}$ representerar fastgodsandel med avseende på volym.

2.3.3 Permeabilitet

En parameter att undersöka för sanden är permeabilitet. Sandens permeabilitetskoefficient är nära kopplad till porositeten och därav också av kornstorleksfördelningen och graderingen av sanden (Qiu et al., 2022). En ökad porositet leder till en ökad permeabilitet.

För att undersöka permeabilitetskoefficienten, k, finns två vanliga provuppställningar; constant-head och falling-head (Al-Khafaji och Andersland, 1992). Constant-head passar permeabla jordar (exempelvis grus eller grovkornig sand) där flödet genom provet är högt. Falling-head är mer lämpligt för lågpermeabla sand eller leror, där flödet av vatten är lägre. Vid

denna provuppställning varierar vattenpelaren ovanpå provet och sjunkningen av vattennivån mäts i stället. Permeabilitetskoefficienten k vid ett falling-head-test beräknas enligt Al-Khafaji och Andersland (1992) genom:

$$k = \frac{a * L}{A * (t_2 - t_1)} * ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right). \quad (19)$$

- a och A motsvarar arean för vattenpelaren respektive sandbädden i cm^2.
- L är höjden av sandbädden i cm.
- t_1 och t_2 är tid för start respektive stopp av permeabilitetsmätningen i minuter.
- h_1 och h_2 är höjden av vattenpelaren vid start respektive stopp, i cm.

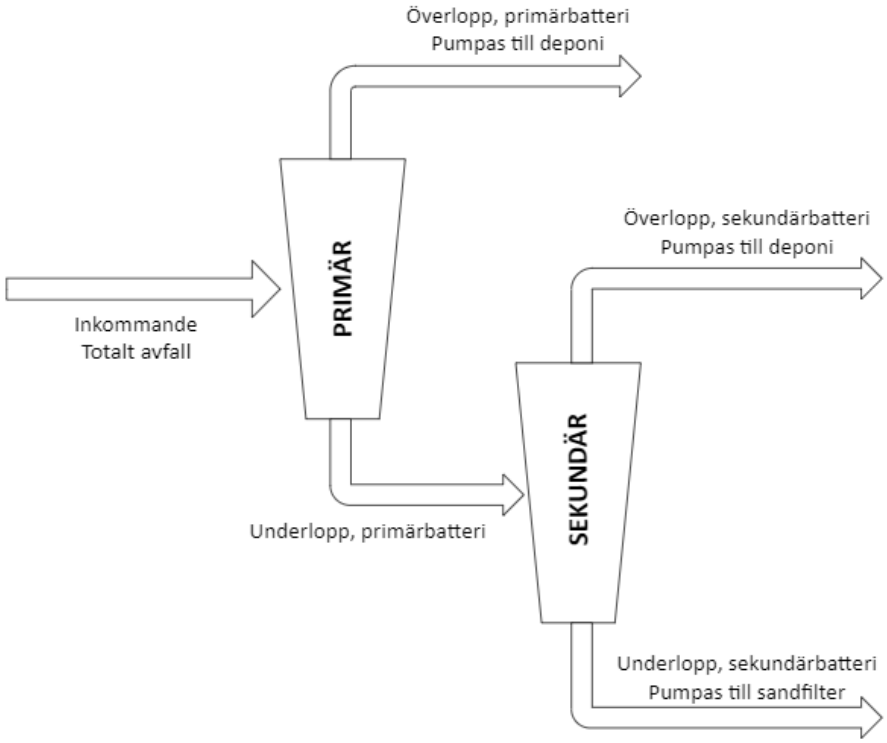
Permeabilitet är en parameter som G1A utför test på, en gång per dygn vid sandproduktion. Resultaten för Kristinebergssanden under det senaste året (01/10 2023-30/09 2024) visar att medelvärdet för permeabiliteten är 15,28 cm/h, samt att minsta respektive största värde är 6,29 och 25,67 cm/h (iPak Report, 2024). En tumregel som Anrikningsverket använder för återfyllnadssand är att en permeabilitetskoefficient på 10 cm/h eller högre anses vara acceptabel.

3 METOD

3.1 Materialparametrar

3.1.1 Kornstorleksfördelning

För att utreda kornstorleksfördelning för G2R togs prover direkt från Anrikningsverket (G1A). Ett prov togs efter flotationssteget i anrikningsprocessen benämnt ”Totalt avfall”, för kontroll av kornstorleksfördelning innan cyklonisering. Detta är flödet som vanligtvis pumpas ut för deponi i sandmagasinet Hötjärn. Andelen finmaterial i detta steg varierar självklart beroende på malmsort och mineralogi men är generellt sett alldeles för hög för att kunna användas i återfyll utan cyklonisering. Detta innebär att finkornigt material separeras bort med hjälp av sandcykloner. På detta sätt är det möjligt att uppnå en godtagbar kornstorleksfördelning och permeabilitet i sanden. En schematisk bild för cykloniseringsprocessen vid anrikning visualiseras nedan i Figur 6.



Figur 6: Cykloniseringsprocessen G1A

Cykloniseringen består av två steg, primär och sekundär. Det finare och lättare materialet separeras ut genom överloppen via en centrifugal process. Det tyngre, grövre materialet flödar vidare till nästa steg, sekundärbatteriet respektive sandfilter. Det andra provet benämnt ”U.L Sekundär”, är flödet som pumpas till sandfiltret för avvattning och senare transport till gruvan.

Proven tas till laboratorium för filtrering och torkning i torkskåp. Provet ”maldes” senare ned med kavel för att separera sandpartiklar som klumpat ihop sig. Det torra provet analyserades sedan med hjälp av laserdiffraktion i Malvern Mastersizer 3000 för att slutligen fastställa kornstorleksfördelningen. Baserat på resultatet kan cyklonerna ställas in beroende på om mer eller mindre material önskas separeras bort genom att:

- öka eller minska vattenflödet
- öka eller minska trycket på cyklonerna
- öppna eller stänga cykloner i både primär- och sekundärsteget.

Tidigare undersökningar på Rävlidenmalmen visade enligt företaget att likheter bland egenskaperna med en annan fyndighet, Renströmsmalmen, var stora. Av denna anledning utfördes ovan beskrivna procedur först under en Renströmskampanj i anrikningsverket, för att veta ungefär hur PSD-kurvan placerar sig och därmed vara bättre förberedda under Rävlidskampanjen, med tanke på att kampanjen bara pågick i 5 dagar. Torkning och kornstorleksanalys av proven tar flera timmar att utföra, vilket inte ger så många försök att få inställningarna till cykloniseringsprocessen rätt under en och samma kampanj.

Kornstorleksfördelningen från Malvern gav inte kornstorleken där 60% av materialet passerar, vilket är av intresse för enhetlighetskoefficienten. Därmed uppskattades den kornstorleken med hjälp av interpolering enligt Ekvation (20) nedan.

$$D_{60\%} = (D_{>60\%} - D_{<60\%}) * \frac{60 - P_{<60\%}}{P_{>60\%} - P_{<60\%}} + D_{<60\%}. \tag{20}$$

- $D_{>60\%}$ representerar kornstorleken där mer än 60% av materialet passerar.
- $D_{<60\%}$ är kornstorleken där mindre än 60% passerar.
- $P_{<60\%}$ och $P_{>60\%}$ står för andelen som passerar vid respektive mätpunkt över och under 60 passerande viktprocent.

3.1.2 Densitet

Densitet för Rävlidensanden utvärderades med hjälp av en gaspyknometer. Tre stickprov togs från Rävlidensanden som vid detta tillfälle befann sig på sandplanen i Renström. Dessa prov torkades i ugn i två dygn för att garantera att ingen fukt förekom i proven. Därefter fylldes provbägaren med Rävlidensand innan den tillsattes i gaspyknometern, en ”AccuPyc II 1340”.

3.1.3 Fuktkvot

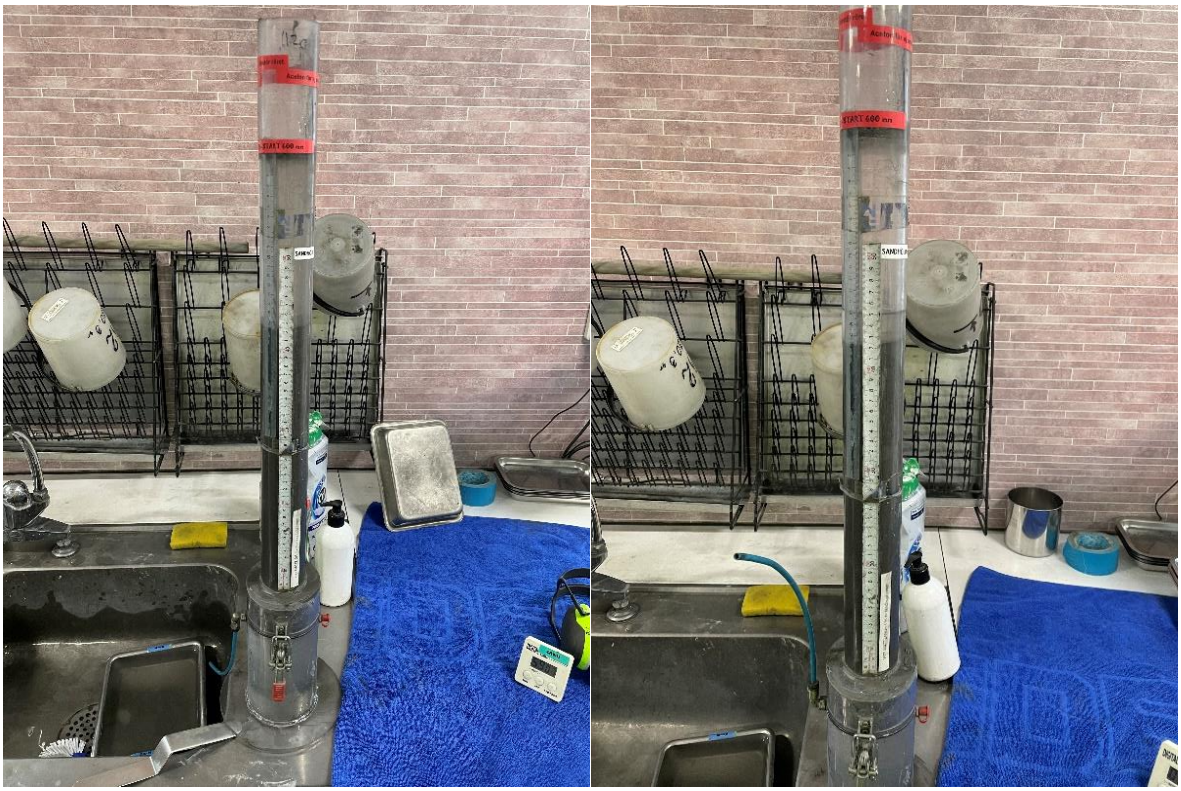
För att bindemedelshalt och fastgodsandelen i slurryn ska motsvara eftersträvat recept är fuktkvoten i materialet en väsentlig parameter. För att ta reda på fuktkvoten i sanden placerades ett prov på cirka 100 gram ur respektive provhink på en bricka. Brickan vägdes först utan material och sedan med material. Efter att provet torkat i ugn, vägdes provbrickan igen. Fuktkvoten, μ, i materialet beräknas genom:

$$\mu = \frac{m_{före} - m_{efter}}{m_{efter}} * 100\ [\%]. \tag{21}$$

Vid tillverkning av provkropparna subtraheras sedan fukten i sanden från den teoretiskt tillsatta vattenmängden för att uppnå önskad fastgodsandel. Den första omgången med Rävlidensand hämtades direkt från sandfiltret i sandsilon. Resterande sand hämtades från sandplanen i Renström.

3.1.4 Permeabilitet

Permeabiliteten i Rävlidensanden mättes genom ett falling-head-test. Tillvägagångssättet är att först väga upp ca 1600 gram torr sand och blanda med vatten till en slurry. Slurryn hälldes i provröret (synlig i Figur 7) som i botten hade ett filter för att släppa genom vatten. Provröret fylldes sedan upp till 600 mm med vatten och läts sedan sedimentera. Efter att 30 minuter passerat och sanden hunnit sätta sig, fylldes röret återigen upp till 600 mm med vatten. Därefter mättes sandbäddens nivå och kranen på botten öppnades. Tidtagningen började vid detta skede.



Figur 7: Permeabilitetsröret vid start (t.v) och efter 50 minuter (t.h)

Vattennivån får inte sjunka till nivån av sandbädden, i vilket fall testet får avbrytas. I detta fall var arean för vattenpelarröret motsvarande arean för sandbädden ($a = A$), vilket ger att Ekvation (19) kan förenklas:

$$k = \frac{a * L}{A * (t_2 - t_1)} * ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \frac{L}{(t_2 - t_1)} * ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right). \quad (20)$$

3.2 Provkroppstillverkning

3.2.1 Enaxiell tryckhållfasthetstest

För att tillverka provkroppar vägdes först det torra materialet, nämligen sand och cement. Mängden cement beror på vilken bindemedelshalt som eftersträvas. Bindemedelshalten definieras som andel av totalt fastgods:

$$b.m = \frac{m_{cement}}{m_{sand} + m_{cement}} * 100\ [\%]. \quad (22)$$

Då de fasta materialen var tillförda tillsattes vattnet sakteliga i den mängd för att motsvara fastgodsandelen som önskades.

I en del av proven adderades även tillsatser utefter rekommenderad dosering. Vid användning av endast ett tillsatsmedel adderades 500 g/ton. Vid användning av två eller fler sorters tillsatsmedel överskred inte den totala mängden 500 g/ton, utan fördelades emellan

tillsatsmedlen för att totalt uppnå 500 g/ton. Mängden tillsatsmedel i proven är baserat på totala slurryvikten. Tillsatsmedlen som användes var vattenlösliga och löstes därför upp i vattnet innan vattnet adderades i fastgodset.

Slurryn blandades därefter med borrmaskin och blandarstav i cirka 90 sekunder till en homogen massa innan den hälldes i provkropparna. Proven läts brinna ihop i ett dygn innan de placerades i vattenbad för härdning, se Figur 8 nedan. Härdning i vattenbad användes för att simulera den fuktiga miljö som råder underjord samt för att motverka ifall större temperaturvariationer skulle förekomma under dygnet.

Figur 8: Provkroppar i vattenbad

Provformarna för tryckhållfasthetstestet hade dimensionen 10 x 32 cm (diameter x höjd) invändigt. För varje försökserie tillverkades 3 provkroppar. I botten placerades en filterduk för att tillåta dränering genom botten utan att släppa igenom fastgods. Recept för provkropparna redovisas i Appendix D.

Tanken bakom recepten som blandats är att undersöka 4 faktorer bakom enaxiell tryckhållfasthet:

- härdningstid
- bindemedelshalt
- tillsatser
- fastgodsandel.

Idén är att undersöka hur ändringen av var parameter i slutändan påverkar enaxiell tryckhållfasthet för provet.

3.2.2 Segregationstest

Återfyllnadsslurryn för segregationstestet tillverkads på samma sätt som för enaxiella tryckhållfasthetstestet. Fullständiga recept som redovisas i Appendix D. Därefter hälldes slurryn i provkropparna, som i detta fall bestod av plaströr i dimensionen 66 x 1200 mm (diameter x höjd, invändigt). Botten var tät och släppte inget dräneringsvatten. Proven förvarades sedan stående och vattenmättade likt för provkropparna för enaxiell tryckhållfasthet, se Figur 8. Proven läts sedan sedimentera i 21 dagar innan avemballering, provtryckning och slutligen kornstorleksfördelning undersöktes.

För varje försöksuppställning utfördes ett prov. Ett referensprov utan tillsatser för vardera av Rävliden och Kristinebergssanden samt två prov av Rävlidensand tillsammans med tillsatsmedel MF501 respektive MF905. Recept för provkropparna redovisas i Tabell 1 nedan.

Tabell 1: Recept för segregationstest

Nr.	Sand	Beskrivning / tillsats	d [g/ton]	f.g [%]	b.m [%]
1	G2K	Referens	-	60	8,0
2	G2R	Referens	-	60	8,0
3	G2R	MF 501	500	60	8,0
4	G2R	MF 905	500	60	8,0

Här användes en lägre fastgodsandel, för att mer likna förutsättningarna som råder i anläggningen i nuläget. Segregation kan tänkas öka vid lägre fastgodsandel med tanke på att mer vatten är i rörelse vid sedimenteringen.

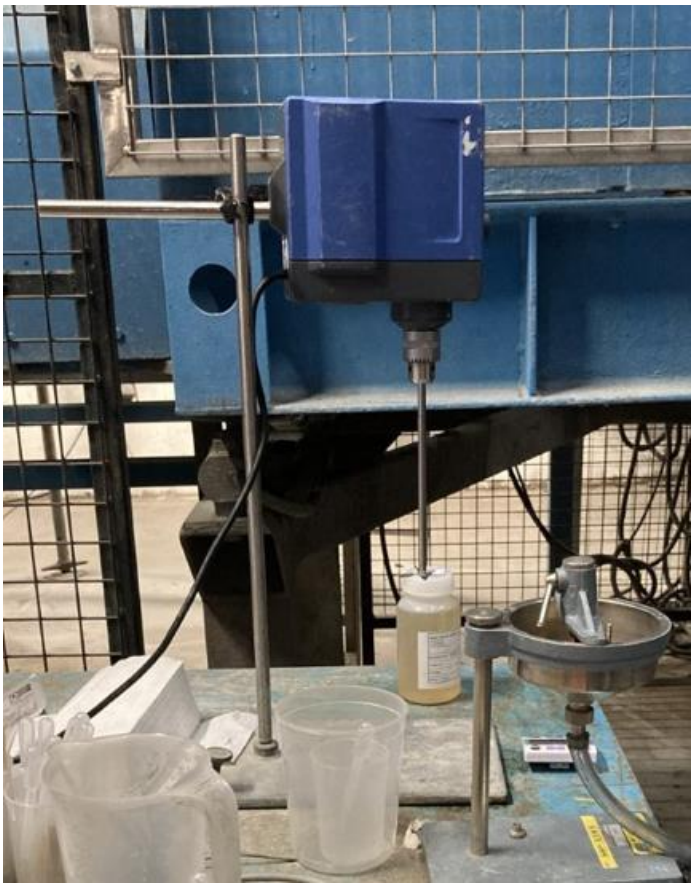
3.3 Laboratorietester

3.3.1 Flytbarhet

Normalt sett kan lämpliga tillsatsmedel utses genom att undersöka diverse kemiska egenskaper i sanden, vattnet och cementen. Vid detta tillfälle fanns inte möjligheter att utföra dessa undersökningar innan laboratorietillfället. I stället utfördes en snabb screening för att undersöka

flytbarheten i återfyllnadsslurryn vid addering av diverse tillsatsmedel. På detta vis kunde effekten av varje tillsatsmedel enkelt jämföras med varandra.

Vid den första försöksuppställningen blandades 300 gram våt Rävlidensand till 8% bindemedel enligt Ekvation (22) samt till 75% fastgodsandel enligt Ekvation (17). En fastgodsandel på 75% befinner sig i den högre delen av intervallet för en normal fastgodsandel vid hydraulfyll, det vill säga en relativt trögflytande massa. Detta förenklar visuella effekten av tillsatsmedel kontra om en mer lättflytande (lägre fastgodsandel) hydraulfyll hade använts.



Figur 9: Omrörare

Addition av tillsatsmedel gjordes i vattnet, innan inblandning av anrikningssand och bindemedel. Bearbetbarheten i slurryn undersöktes med träspatel i genomskinliga provbägare enligt Figur 10, och effekten av tillsatsmedlen rangordnades därefter.

Figur 10: Provbägare för tillsatsmedlen (20240806)

Ett referensprov vardera för Rävlidensand och Kristinebergssand utan tillsatsmedel, samt 12 ytterligare prov för Rävlidensand tillsammans med olika tillsatser utfördes. Fullständiga recept redovisas nedan i Tabell 2.

Tabell 2: Recept för undersökning av flytbarhet

Nr.	Sand	Beskrivning	d [g/ton]	f.g [%]	b.m [%]
1	G2K	Referens	-	75	8,0
2	G2R	Referens	-	75	8,0
3	G2R	MF 705	500	75	8,0
4	G2R	MF 308	500	75	8,0
5	G2R	MF 914	500	75	8,0
6	G2R	MF 906	500	75	8,0
7	G2R	MF 905	500	75	8,0
8	G2R	PT 1856	500	75	8,0
9	G2R	MVA 2321	500	75	8,0
10	G2R	MVA 3165	500	75	8,0
11	G2R	MF 916	500	75	8,0
12	G2R	MF 909	500	75	8,0
13	G2R	MF 501	500	75	8,0
14	G2R	MF 510	500	75	8,0

Då flytbarheten undersökts lämnades bägarna för härdning till dagen efter, för att se om någon annan noterbar effekt uppträder.

3.3.2 Viskositet

För att genomföra ett Marshkontest blandas först valfri vätska, i detta fall alltså hydraulfyll och hälls vätskan genom sikten på konen samtidigt som öppningen täpps till med ett finger. När konen är fylld till översta strecket, 1,6 quarts eller 1500 ml, avlägsnar man fingret från konens mynning och startar tidtagaruret. Vätskan börjar flöda ut från botten av konen och samlas upp med hjälp av den tillhörande bägaren, se Figur 11 nedan. Tiden som tar att fylla bägaren till markeringen på en quart antecknas, då denna går att omvandla till effektiv, dynamisk viskositet genom Ekvation (15).

Figur 11: Marshkon och bägare

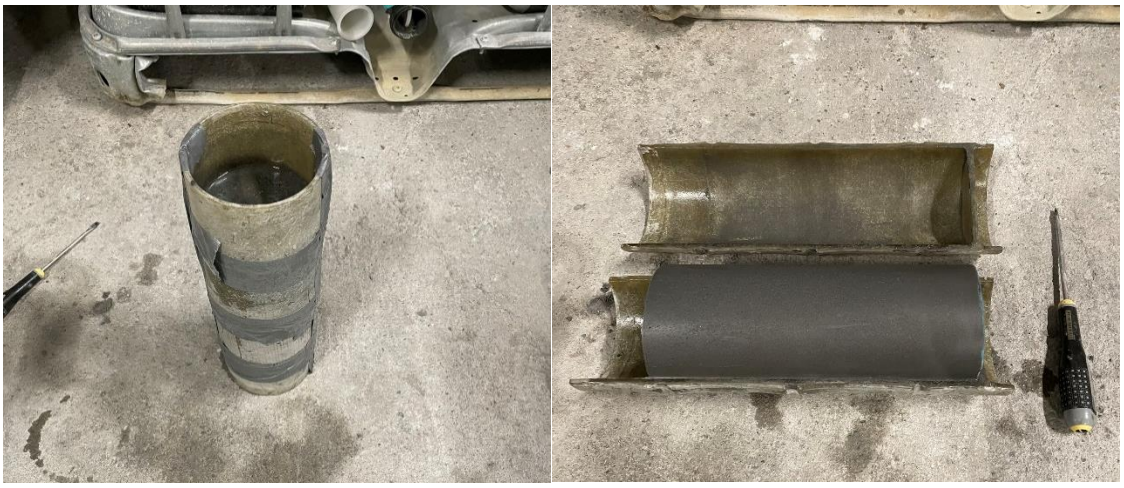
Försöket med Marsh viskosimeter går ut på att undersöka viskositet korrelerad mot fastgodsandel. Serien börjar på 55% fastgodsandel, och stegar sedan uppåt med en ökning av 3% varje steg, tills 76% fastgodsandel uppnåtts. Då är det ”vanliga” intervallet för fastgodsandelar i hydraulfyllar undersökt, vilken vanligen sträcker sig uppemot 75%.

En serie utfördes för Kristinebergssanden som referens, en med Rävlidensand och två med Rävlidensand tillsammans med olika sorters tillsatsmedel för att förbättra flytegenskaperna. I detta fall användes ett prov med high-range water reducer (HRWR) och viskositetsmodifierande tillsatsmedel (VMA).

Med denna fältmetod är det möjligt att undersöka reologiska skillnader mellan G2K- och G2R-sand samt eventuella effekter av tillsatsmedlen. Metoden kan ge en indikation på om hydrauliska fyllen kan fungera i rörsystemet i Renström, som idag klarar Kristinebergssanden.

3.3.3 Enaxiell tryckhållfasthet

Enaxiell tryckhållfasthet undersöktes genom att först avlägsna provkroppen från vattenbad efter avsedd härdningstid. Provet avemballerades genom att försiktigt separera provformarna enligt Figur 12. Därefter inspekterades provet för eventuella skador. Om provet var skadat gjordes en bedömning om denna påverkade tryckhållfastheten, baserat på resultaten av de två andra proven i samma serie. Ifall brottytan synligt passerade genom detta skadade område, ströks resultatet.



Figur 12: Avemballering av provkropp

Provkroppen kapades därefter i båda ändar för att garantera ett rakt snitt och jämn belastning under tryckhållfasthetstestet. Provkroppen vägdes sedan, höjden kontrollerades och dessa resultat antecknades, se Figur 13 nedan. Provet kontrollerades även för skador vid detta stadie. Om skadan bedöms vara för stor, stryks densiteten från serien.

Figur 13: Kapning och vägning av provkropp.

För att mäta enaxiell tryckhållfasthet komprimerades provkropparna med töjningshastigheten 1,270 mm/min i axiell riktning, tills brott uppstått och punktlasten sjunkit till 80% av maximalt

uppmätt värde. Om provet understeg 19 cm (<95% av planerad höjd) ströks resultatet för enaxiell tryckhållfasthet. Vikten och höjd på eventuellt korta prov behölls, för att fastställa densitet.

Figur 14: Försöksuppställning, enaxiell tryckhållfasthet

3.3.4 Segregationstest

För segregationstestet avlägsnades först provkroppen från vattenbadet efter 21 dagars härdning. Provkroppen delades sedan 15 cm-segment för att ge utrymme till kapning, se Figur 15. Diametern på provröret var 66 mm, vilket resulterar att höjden ska motsvara 132 mm för att uppfylla principen H = 2 x H.

Figur 15: Kapning av provrör, segregationstest

Vid kapning påträffades ohärdad fyll i mittenpartierna av provrören och avemballering med provet intakt var inte möjligt. Tanken att trycktesta provkropparna övergavs i detta stadie. Fyllmaterial uppsamlades från höjderna 0, 15, 30, 45 och 60 cm enligt Figur 16 nedan och sparades för kornstorleksanalys.

Figur 16: Uppsamling av material för PSD-analys

För att utföra kornstorleksfördelningsanalys på de olika provhöjderna, placerades bägarna i ugn i två dygn. Efter att proven torkat, ”maldes” proven ner med kavel för att bryta

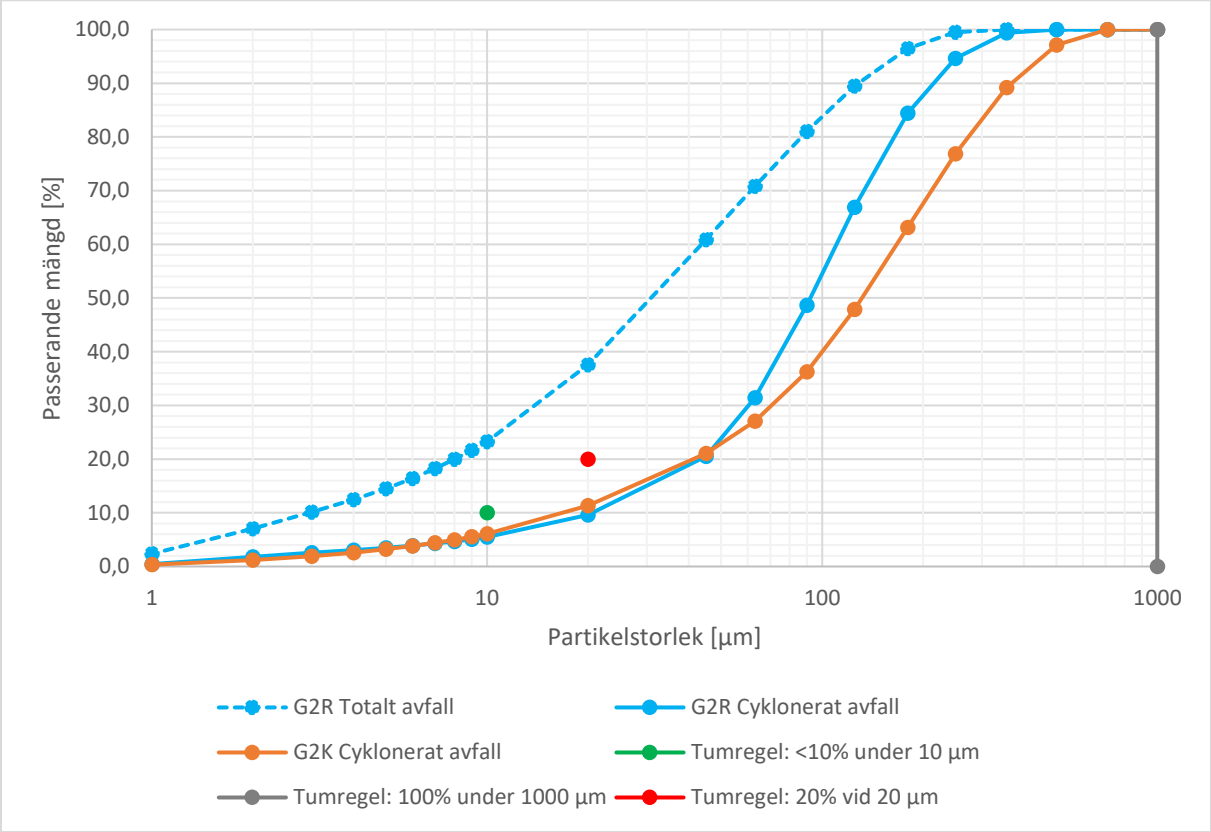
cementbindningarna mellan partiklar och därmed få fram ett rent sandmaterial. Proven analyserades likt proceduren i avsnitt *3.1.1 Kornstorleksfördelning*.

4 RESULTAT

4.1 Materialparametrar

4.1.1 Kornstorleksfördelning

Återfyllnadssanden producerades under en kampanj av Rävliden som gick in på Anrikningsverket G1A vecka 25, 17-21 juni 2024. Resultatet för kornstorleksfördelning av G2R-sand visualiseras i Figur 17 nedan, med partikelstorlek på cykloniserad Kristinebergssand som referensvärde.



Figur 17: Kornstorleksfördelning

Resultatet från laserdiffraktionsmätningen visade att 5,5% passerade 10 µm, 9,6% passerade 20 µm samt att 100% passerade 500 µm för Rävlidensanden. Det fullständiga resultatet för kornstorleksfördelningen återfinns i Appendix A. Det cykloniserade avfallet för de båda malmtyperna överensstämmer väl i intervallet 0-45 µm. Därefter ökar kornstorleken kontra passerande mängd avsevärt mer för G2K- än G2R-sand.

För att beräkna graderingstalet för Rävlidensanden, behövs först kornstorleken där 60 viktprocent av materialet passerar genom att interpolera via Ekvation (20):

$$D_{60\%} = (125 - 90) * \frac{60 - 48{,}6}{66{,}9 - 48{,}6} + 90 = 111{,}8\ \mu m. \tag{20}$$

Därefter kan graderingstalet beräknas med hjälp av Ekvation (16):

$$c_u = \frac{D_{60\%}}{D_{10\%}} = \frac{111{,}8}{21{,}1} = 5{,}3\ [-]. \quad (16)$$

4.1.2 Densitet

Resultat för densitetsmätningen av Rävlidensanden gav ett genomsnittsvärde på 3,16 t/m^3. Resultat för pyknometermätningar för samtliga provpunkter redovisas nedan i Tabell 3. Fullständiga rapporter från pyknometern bifogas i Appendix B.

Tabell 3: Resultat, densitet

Provnr.	Sand	$\boldsymbol{\rho}\ [\frac{\boldsymbol{t}}{\boldsymbol{m^3}}]$	$\boldsymbol{\rho_{avg}}\ [\frac{\boldsymbol{t}}{\boldsymbol{m^3}}]$
1	G2R	3,1822	3,16
2	G2R	3,1237	
3	G2R	3,1849	

4.1.3 Fuktkvot

Fuktkvoten i de olika provhinkarna för Rävlidensanden varierade mellan 9,2 och 12 procent för hinkarna som hämtats vid sandfiltret, och mellan 4,3 och 8,0 procent för hinkar som hämtats från sandplanen i Renström. Kristinebergssandens fukthalt varierade mellan 5,5 och 11,1 procent och även denna sand inhämtades från sandplanen i Renström. Fullständiga resultat för fuktkvot redovisas nedan i Tabell 4.

Tabell 4: Resultat, fuktkvotsberäkningar

Hink nr.	Sand	Datum:	Plats:	$m_{före}$	m_{efter}	fuktkvot [%]
1	G2R	20240619	Sandfilter, G1A	81,38	72,47	**12,3**
2				118,45	108,34	**9,3**
3				98,45	88,54	**11,2**
4				95,26	85,78	**11,1**
5		20240620		100,59	90,23	**11,5**
6				122,03	109,55	**11,4**
7				130,95	119,16	**9,9**
8				69,19	61,76	**12,0**
9	G2K	20240725	Sandplan, G1R	101,32	91,22	**11,1**
10				135,30	124,98	**8,3**
11				97,17	87,91	**10,5**
12				111,04	101,7	**9,2**
13				106,66	97,59	**9,3**
14				109,45	99,61	**9,9**
15	G2R	20240820		74,76	70,75	**5,7**
16				63,46	59,54	**6,6**
17				72,48	67,66	**7,1**
18				69,16	65,31	**5,9**
19				59,13	55,58	**6,4**
20				67,09	64,31	**4,3**
21				62,69	58,03	**8,0**
22	G2K			65,98	62,56	**5,5**

4.1.4 Permeabilitet

Vid permeabilitetstestet uppmättes sandhöjden 42,5 cm och vattenpelaren sjönk från 60 cm till 45 cm på provtiden 50 minuter. Med dessa värden kan permeabiliteten beräknas med hjälp av Ekvation (20):

$$k = \frac{L}{(t_2 - t_1)} * ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \frac{42{,}5}{(50-0)/60} * ln\left(\frac{60}{45}\right) = 14{,}67\ cm/h. \quad (20)$$

4.2 Laboratorietester

4.2.1 Flytbarhet

Vid undersökning av flytbarhet vid addering av tillsatser, utmärkte sig två av tillsatsmedlen. Alla tillsatsmedel gav någon sorts effekt i bearbetbarhet men särskilt högst effekt fick:

1. MF905. Hybridprodukt, både sättningsförbättrande egenskaper samt viskositetsförändrande.
2. MF501. Tillsatsmedel för förbättrade flytegenskaper, VMA.

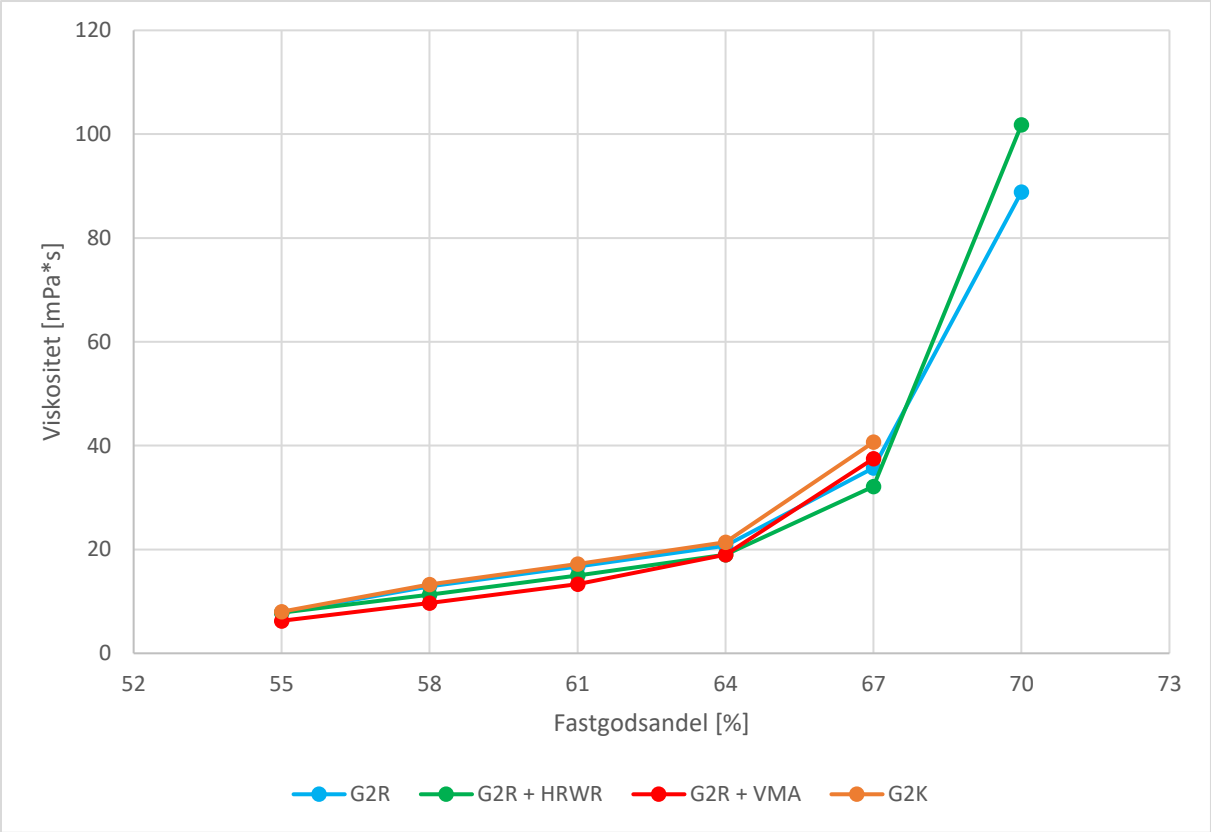
Provkroppar med dessa tillsatsmedel blandades därefter för enaxiell tryckhållfasthet.

Efter att bägarna härdat i ett dygn upptäcktes en särskiljande egenskap för blandningen med MF308 (sättningsförbättrande tillsatsmedel). Alla prov blödde mer eller mindre vatten, allt ifrån en fuktad yta till uppemot en centimeter stående vatten, men för MF308-bägaren var ytan helt torr. Notera bilden nedan (Figur 18), som är tagen ett dygn efter blandningen.

Figur 18: Provbägare för flytbarhet efter 24 timmar (20240807)

4.2.2 Viskositet

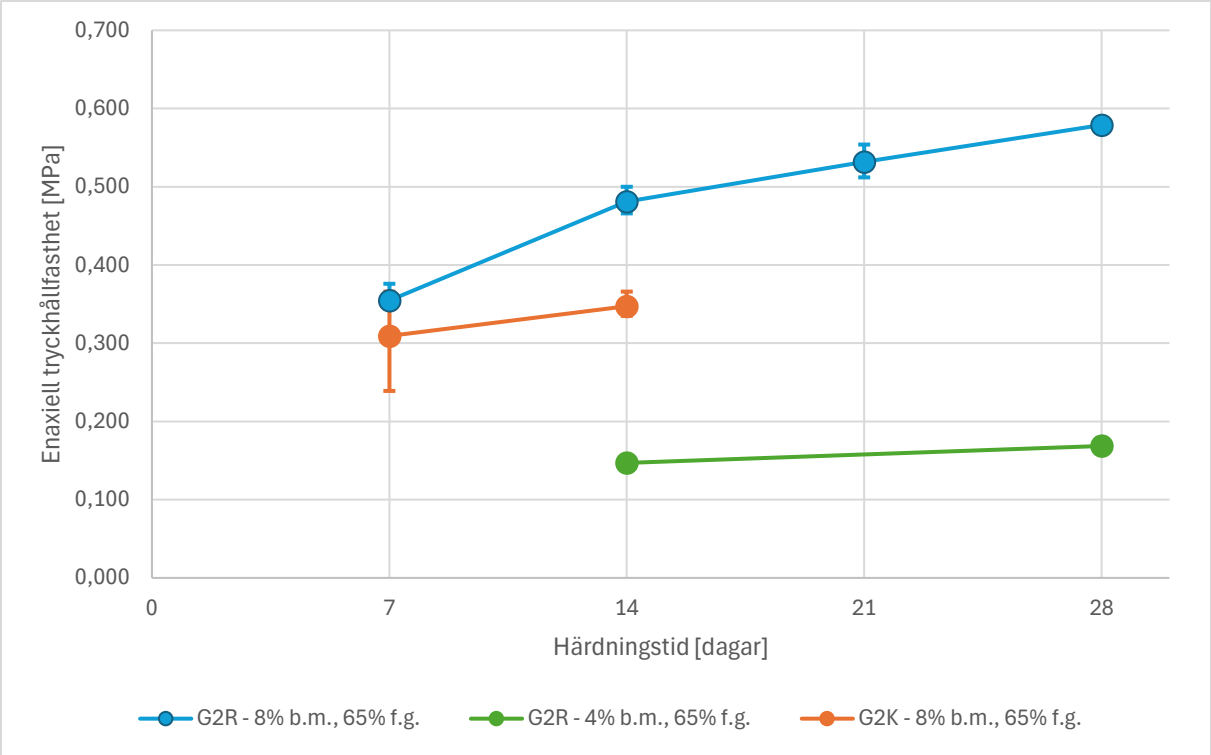
Viskositetsmätning med hjälp av Marshkon gav effektiv dynamisk viskositet enligt Figur 19 nedan. Steget i fastgodsandel där konen satte igen dokumenterades i Appendix E för de olika försöksuppställningarna.



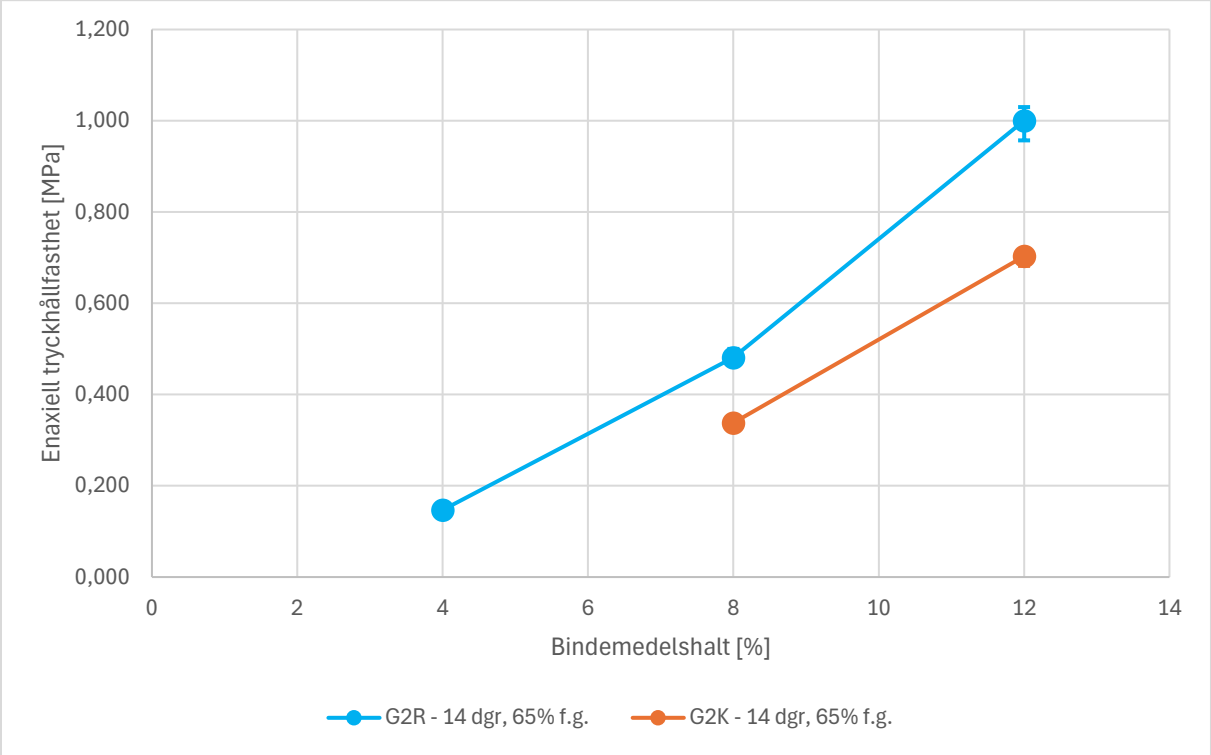
Figur 19: Effektiv dynamisk viskositet m.h.a Marshtest

4.2.3 Enaxiell tryckhållfasthetstest

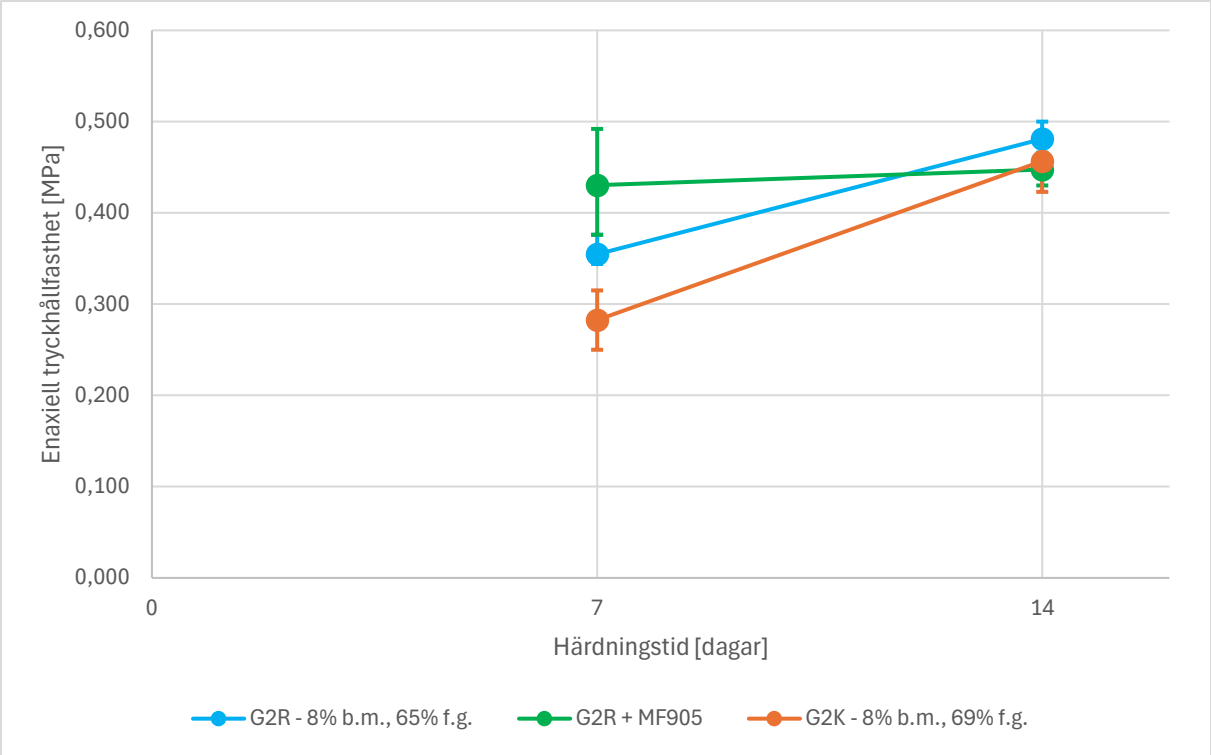
Resultaten för provtryckningar av serierna redovisas nedan i Figur 20-24 utifrån parametrarna definierade i *3.2.1 Enaxiell tryckhållfasthet*. Fullständiga data från provtryckningarna presenteras i Appendix D.



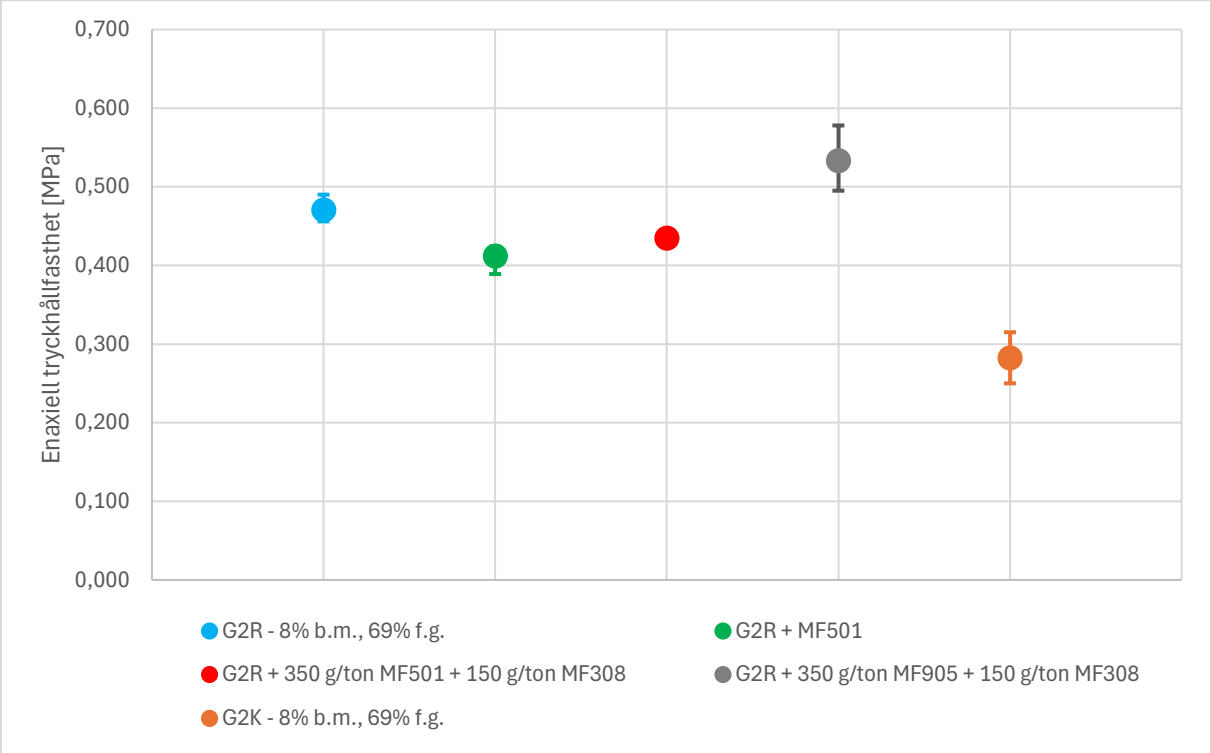
Figur 20: Enaxiell tryckhållfasthet kontra härdningstid.



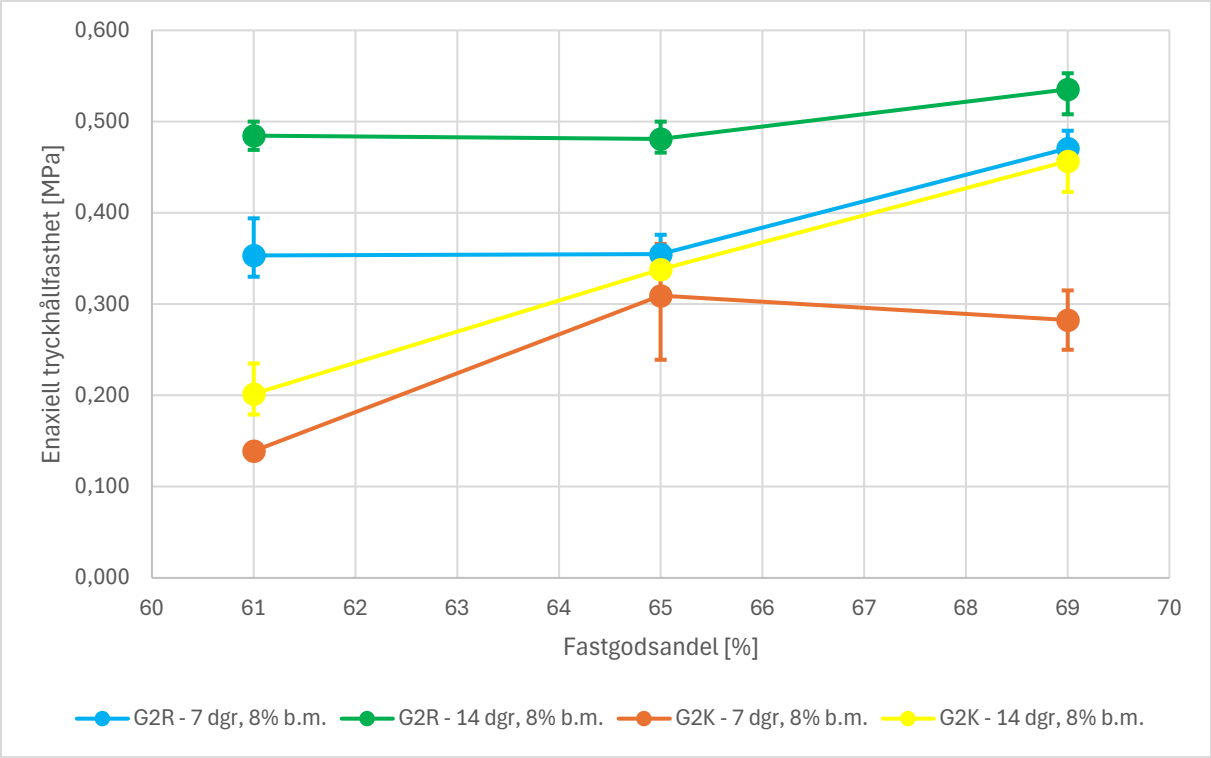
Figur 21: Enaxiell tryckhållfasthet kontra bindemedelshalt.



Figur 22: Enaxiell tryckhållfasthet kontra tillsatsmedel.



Figur 23: Enaxiell tryckhållfasthet kontra tillsatsmedel, 7 dagars härdning.

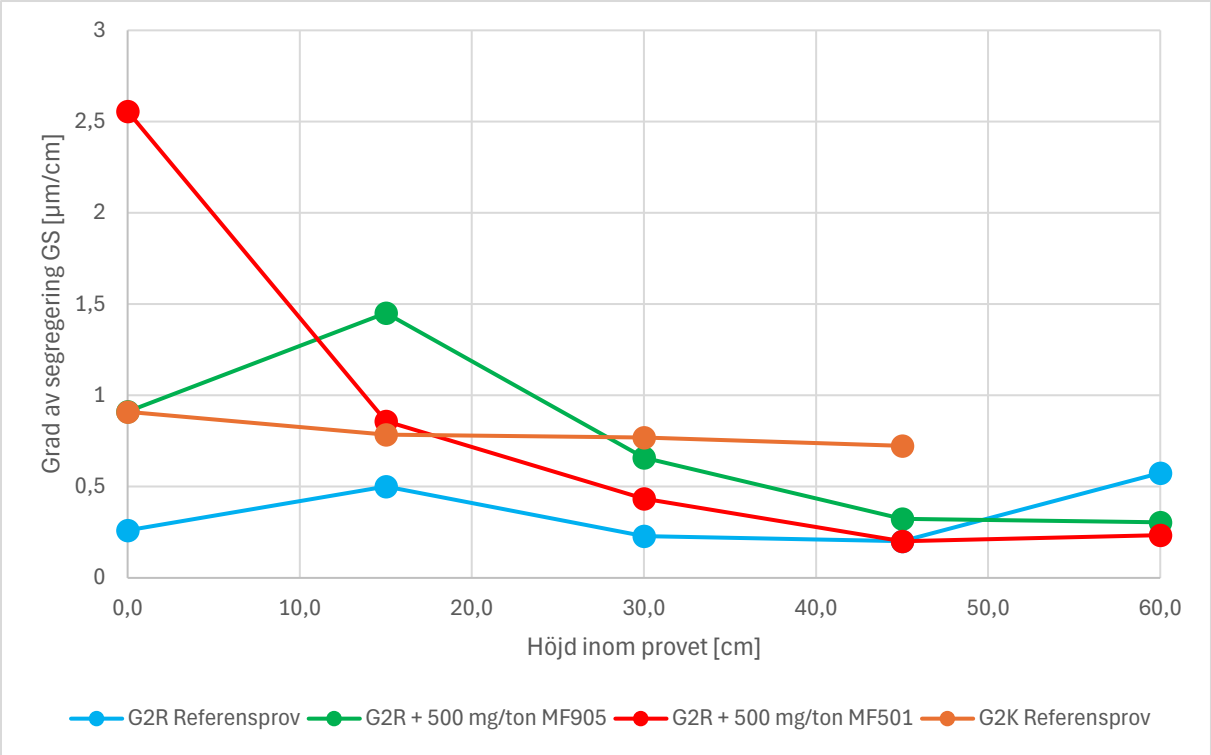


Figur 24: Enaxiell tryckhållfasthet kontra fastgodsandel.

Densiteten varierade för Rävlidenserierna mellan 1949 och 2020 kg/m^3, med ett genomsnittsvärde på 1979 kg/m^3. Maxvärdet uppmättes på 14-dagarsprovet med 8% bindemedel och 69% fastgodsandel. Minsta värdet på 7-dagarsprovet med 8% bindemedel, 65% fastgodsandel samt 500 g/t MF905. För Kristinebergsserierna var motsvarande intervall 2002 - 2219 kg/m^3, med genomsnittsdensiteten 2131 kg/m^3. Maximala värdet uppmättes på 14-dagarsprovet med 12% bindemedel och 65% fastgodsandel. Minsta uppmätta värde vid 7-dagarsprovet med 8% bindemedel och 61% fastgodsandel.

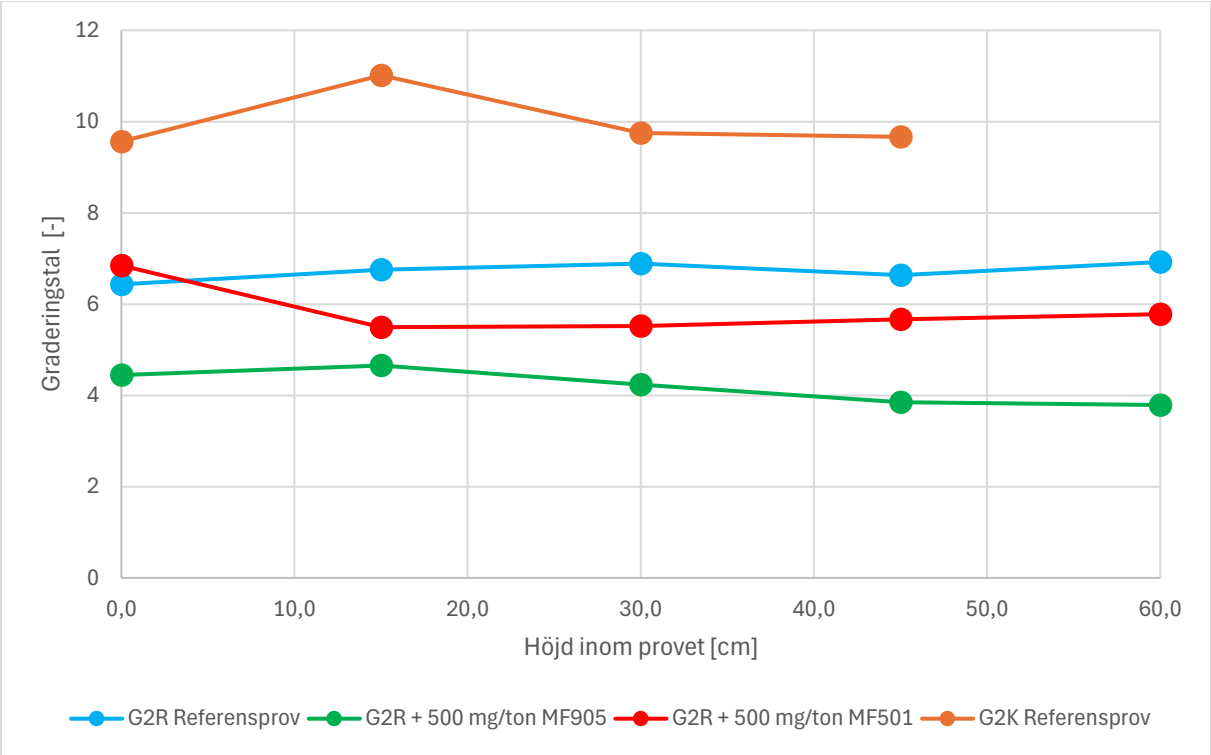
4.2.4 Segregationstest

Segregationsgraden redovisas nedan i Figur 25. Notera att mätpunkten för det översta lagret, 60 cm, saknas för G2K-provet. Kornstorleksfördelning för provuppställningarna redovisas i Appendix A.



Figur 25: Grad av segregation.

Graderingstalet, eller relationen mellan $D_{60\%}$ och $D_{10\%}$ enligt Ekvation (16), presenteras den nedan i Figur 26.



Figur 26: Graderingstal.

5 ANALYS & DISKUSSION

5.1 Materialparametrar

Rävlidensanden som ligger till grund för detta examensarbete är hämtad från en kort kampanj (drygt 4 dygn) av Rävlidenmalm på Anrikningsverket. Troligtvis kommer all malm från samma skivpall. Hur parametrarna som undersökts (såsom kornstorleksfördelning, permeabilitet, densitet o.s.v.) varierar över resterande del av fyndigheten är okänt och material för vidare undersökning.

5.1.1 Kornstorleksfördelning

Tumreglerna att inte mer än 10% passerande vid 10 µm samt inga partiklar över 1000 µm/1 mm uppfylldes. Målbilden att vara nära 20% passerande material vid 20 µm kan konstateras som inte uppfylld, endast 9,6% av materialet passerade. En för stor andel finkornigt material sorterades därmed bort vid cykloniseringsprocessen. Att ställa in cyklonerna korrekt är en process som kommer att ta några försök, möjligtvis kampanjer. Med tanke på att torkning och analys av proven tar timmar att utföra beslutades det att för att kunna garantera enhetlighet för den framställda sanden att inte ändra cykloniseringsinställningar under kampanjens gång. För att få lite högre säkerhet bakom kornstorleksfördelningen hade det varit nyttigt att utreda hur den varierar med kommande Rävlidenkampanjer.

Hur stor andel av sanden som cykloniserades bort gentemot hur stor andel som blev återfyllnadssand undersöktes inte. Detta är ett ämne för vidare studier. Samtidigt som det inte är möjligt att ha för hög finandel av hydrauliska och permeabla skäl, måste finmaterial som separeras tas om hand på annat sätt. Detta är vanligtvis deponi, vilket helst undviks med tanke på kapaciteten på Hötjärnsmagasinet.

5.1.2 Densitet

Att Rävlidensanden uppvisade lägre densitet jämfört med Kristinebergssanden leder till att slurryn blir tjockare och mer trögflytande jämfört med motsvarande fastgodsandel för Kristinebergsproven. Detta leder även till att en viktenhet Rävlidensand skulle återfylla en större volym än samma viktenhet för Kristinebergssanden.

Med densiteten på Rävlidensanden känd kan fastgodsandel med avseende på viktprocent beräknas för att uppnå fastgodsmålet på 47,5 volymprocent, enligt Ekvation (18) från avsnitt *2.3.2 Densitet*.

$$\%_{Cw} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{1}{3{,}16 * 0{,}475}\right) - \left(\frac{1}{3{,}16}\right)\right)} = 74\%. \quad (18)$$

Vid 47,5 volymprocent är en fastgodsandel menar Grice (1998) att det uppstår en jämvikt mellan att minimera vattnet som är nödvändigt som transportmedel för hydraulfyllen. Samtidigt minimeras överskottsvattnet som måste dräneras från rummet. För att uppnå 47,5 volymprocent för Kristinebergsanden krävs enligt samma ekvation:

$$\%_{Cw} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{1}{3{,}55 * 0{,}475}\right) - \left(\frac{1}{3{,}55}\right)\right)} = 76\%. \quad (18)$$

Dessa fastgodsandelar är betydligt högre än vad som används i nuläget i anläggningen i Renström. Vanligtvis ligger man kring intervallet 55-60 viktprocent fastgods. Begränsande faktor i nuläget är siktarna i sandstationen, där ett högt vattenflöde krävs för att materialet ska ta sig genom siktarna.

5.1.3 Fuktkvot

Fuktkvoten utreddes främst med anledning att receptet på proven skulle bli så precisa som möjligt och i början lades ingen större vikt vid värdet, utan receptet/tillsatt vatten anpassades till resultatet för fuktkvoten. Vad jag reflekterar på i efterhand är att vid materialsamlingen 20 augusti 2024 uppmättes en fuktkvot på 5-6% på både Rävlidensanden och Kristinebergssanden. Detta på sand som legat ute och varit oskyddat för regn över sommaren 2024. Material insamlades från olika delar och olika djup i sandhögen. Spontana tanken var att materialet skulle vara betydligt blötare. Hur fuktkvoten förändrats sedan sanden färdats genom schaktet och gått in på sandstationen 150 meter underjord undersöktes inte, allt material som hämtats i Renström hämtades ovanjord. Schaktet som förser sandstationen med sand är inte beklätt, vilket möjliggör inläckage av grundvatten. Schaktet rymmer dessutom ca 2500 ton, vilket leder att det är ca 4 skift sandstationen måste gå innan den lastade sanden når sandstationen och vidare ner i systemet. Lägg därtill att rummen måste få tid att dränera mellan skiften samt att det inte finns möjlighet att fylla varje skift av olika anledningar. Detta resulterar i att det är uppemot en vecka innan sanden som lastas i schaktet går ut i systemet, vilket ger sanden god tid till att binda fukt.

På sandstationen i Renström beräknas receptet normalt med en fuktkvot på 15% i sanden, vilket är avsevärt högre än vad fuktkvoten i materialet ovanjord visade. Konsekvensen av att inte känna till sandens fuktkvot blir således att slurryn blandas med okänd fastgodsandel

samt okänt tonnage sand kontra vad receptet visar. Ytterligare parametrar för vidare undersökning kan vara hur fuktkvoten i sanden förändras under drift, beroende på årstid, nederbörd och grundvattennivå för att eliminera en felkälla för återfyllningen.

5.1.4 Permeabilitet

Permeabilitetstestet som utfördes visade goda resultat, med en permeabilitetskoefficient på 14,67 cm/h. Tumregeln som Anrikningsverket använder sig utav menar att en permeabilitetskoefficient på 10 cm/h eller högre anses vara acceptabel. Tumregeln är ett erfarenhetsvärde och är baserad på vad som tidigare har fungerat att använda för hydraulisk återfyll.

Permeabiliteten på anrikningssand mäts en gång per dygn på driftlaboratoriet. Genomsnittsvärdet för på Kristinebergssanden var under perioden första oktober 2023 till sista september 2024 15,28 cm/h. Detta är baserat på 70 tester, där högsta och minsta värdet var 25,67 respektive 6,29 cm/h. Att värdet varierade såpass, och framför allt att minsta värdet är mycket lägre än vad som anses vara acceptabelt väcker såklart frågan hur det ser ut för Rävlidensanden. Konfidensen bakom ett test är inte övertygande utan ska nog mer ses som en indikation, speciellt med tanke på variationen på permeabilitetskoefficienten för Kristinebergssanden. Här, liksom för kornstorleksfördelningen, hade det varit nyttigt att följa kommande kampanjer med Rävlidenmalm för att se hur parametern varierar.

Konsekvensen med en låg permeabilitet kan vara dräneringsproblem i fyllrummet underjord. Att ackumulera stående vatten i fyllrummet är också en arbetsmiljöfråga, då vatten bygger ett högre tryck mot fyllväggen än vad en normalt dränerande fyll gör. Det är möjligt att väggen kollapsar av trycket och det uppstår en så kallad ”mud rush”, läckage av vatten eller slurry. Risken är att personal befinner sig i området utanför fyllväggen.

5.2 Laboratorietester

5.2.1 Flytbarhet

Lämpliga tillsatsmedel i en hydraulfyll kan bestämmas genom laboratorieundersökningar av sanden, vattnet och cementens egenskaper. Vid detta tillfälle fanns som sagt varken tid eller möjlighet att utföra detta, utan i stället utfördes en enklare screening. Tillsatsmedlen adderades i en tjockt blandad hydraulfyll av Rävlidensand, och effekterna rangordnades mot varandra. Det hade så klart varit nyttigt med reometertest eller liknande för att få effekten av alla tillsatsmedel i värden, likväl var denna manuella metod det bästa som kunde genomföras.

Att hydraulfyllen blandades tjockt gav enkelt förutsättningar för att kunna avgöra och rangordna effekterna av tillsatsmedlen. De flesta tillsatsmedlen som testades var av viskositetsförändrande typ, antingen VMA eller HRWR, och effekterna blir tydligare i högre fastgodsandelar. Det var också viskositeten som prioriterades i detta försök.

Den andra sortens tillsatsmedel som undersöktes sättningsförbättrande tillsatsmedel. Dessa effekter var svårare att upptäcka manuellt, utan provbägarna läts härda i ett dygn, och efter detta noterades eventuella effekter. Bägaren som innehöll MF308 blödde inget vatten. Ytan var torr, till skillnad mot övriga tillsatsmedel. Provkroppar för enaxiell tryckhållfasthet blandades därför med detta tillsatsmedel. Den uppvisade lite av en förtjockande effekt i bägare, och därav blandades provkropparna med 30% MF308 och 70% MF905/MF501 för att behålla flytbarheten och samtidigt undersöka förändringar i hållfasthet.

Vid addering av tillsatser kan vissa av egenskaperna på hydraulfyllen definitivt förbättras. Exempelvis kan flytbarheten behållas vid ökning av fastgodsandelen vid addering av lämpligt viskositetsförändrande medel. Vid höjning av fastgodsandelen ökar enaxiell tryckhållfasthet för Rävlidenproven enligt testerna som utförts i *Resultat*. Samtidigt medföljer en del andra fördelar, såsom

- mindre vatten skickas in på rummet
- kortare ställtid för dränering
- lägre vattenhanteringskostnader (pumpslitage, elförbrukning och kostnader kopplat till vattenrening).

Vid addering av sättningsförbättrande tillsatsmedel tenderar CHF:en uppnå sluthållfasthet fortare enligt *Resultat*. Detta skulle ge snabbare tillträde till omkringliggande malm. Sättningsförbättrande medel kan också antingen binda vattnet i hydraulfyllen (MF308) eller skynda på konsolideringsprocessen. Vattnet separerar då snabbare från fastgodset, och givet en fungerande dränering kan man fylla mer timmar utan att dränka rummet.

Hur hydraulfyllen förändras reologiskt med viskositetsförändrande medel är en komplicerad forskningsfråga. Det är samma material, fastgods och densitet men samtidigt förändrad flytförmåga på slurryn som skickas ned i rörsystemet. Hur ledningar reagerar på detta är material för vidare undersökning.

En annan parameter som är material för vidare studier är kemiska beståndsdelarna av sanden, processvattnet, cementen och tillsatsmedlen. Kemiska aspekter har varit avgränsade i detta examensarbete av olika anledningar och därav finns det material att undersöka djupare. Det hade varit intressant om en grundlig kemisk analys av nämnda parametrar hade kommit fram till samma rangordning som screeningen i detta fall fastslog.

5.2.2 Viskositet

Viskositetsmätning med Marshkonen fungerade väl i de lägre fastgodsandelarna, 55-64%. I detta intervall var hydraulfyllen nog lättflytande för att inte hinna konsolidera i konen. Mellan serierna skilde det maximalt två sekunder i detta intervall, vilket följaktligen gav en låg differens mellan effektiv dynamisk viskositet. Vid mätpunkten 67% framstod genast en distinkt skillnad, där serierna tog 7-10 sekunder längre än för 64% fastgodsandel. Detta var också sista mätbara testet för Kristinebergssanden och för Rävlidensanden tillsammans med VMA. Vid 70% fastgodsandel satte konen igen rätt omedelbart för Rävlidenprovet tillsammans med VMA samt för Kristinebergprovet. För referensprovet Rävliden samt Rävliden tillsammans med HRWR var samma siffra 73%. Genomgående för alla dessa prov är att de täpptes igen rätt direkt efter att fingret släppts och testet börjat (visualiserat i Appendix E). Vid dessa fastgodsandelar hann materialet sätta sig innan konen ens hade fyllts. Viskositetsundersökning med hjälp av Marshkon är kanske missvisande då materialet rätt snabbt hinner separera och frångå likformigheten som fås då slurryn befinner sig i rörelse. Att konen blev tät antas bero mer på att fastgodsandelen var för hög än att den var för trögflytande. Viskositeten bedömdes inte vara begränsande faktorn i detta fall.

För lägre fastgodsandelar, 55-64%, gav försöken en låg spridning i dynamisk viskositet mellan de olika provuppställningarna. Tiden för att fylla bägaren i detta intervall var exempelvis identisk för referensprovet av Rävliden samt Kristineberg. Densitetsskillnaden mellan Rävliden och Kristinebergssanden gav därmed en knapp ökning av viskositet för Kristinebergsförsöket.

Viskositetsmätning med Marshkon bedömdes ge ett mer tillförlitligt resultat i lägre fastgodsandelar där flödet visuellt var mer likformigt och sättning inte hann ske i konen. Vid 67% och över var iakttagelsen att det hann ske en separation av materialet. Resultaten hade, likt för *Flytbarhet*, varit intressant att jämföra med exempelvis reometertest för att säkert kunna säga om metoden ger representativa värden vid testning av en hydraulfyll.

Vid användning av hydraulfyll bör parametern fastgodsandel baserat på volym beaktas, speciellt om olika typer av sand skall användas i samma anläggning. I detta fall var det en betydande skillnad i densitet på Rävliden- och Kristinebergssand (3,18 respektive 3,55 kg/m^3). Detta ledde till att Rävlidenproven var blandad tjockare och hade högre fastgodsandel sett till volym, vilket kan ses som en lite orättvis jämförelse. I slutändan är ändå målet med en återfyllnadsverksamhet att fylla igen volymen på rummen och inte fylla igen med ett visst tonnage.

5.2.3 Enaxiell tryckhållfasthetstest

För provkroppstillverkning för enaxiell tryckhållfasthet var tanken först att blanda alla tre prov för var serie i betongblandare. Vid blandning av första serien och tappning av sista provet i serien upptäcktes en separation av materialet. Första provet var betydligt vattnigare, samtidigt som sista provet som tappades var betydligt fastare. Tanken att blanda flera prov i taget i betongblandare övergavs därmed. Proven blandades i stället i murarhink, ett åt gången och bara med mängden som rymdes i en provkropp. På detta vis kunde man garantera att receptet som blandats är receptet som tappas i provkroppen. Denna metod tar dock betydligt mer tid per serie. Spridningen på hållfasthet och densitet på proven var väldigt låg, och detta kopplar jag till blandningsmetoden. Med denna metod kan man med högre säkerhet garantera receptet.

Brottytan för Kristinebergsproven var betydligt synligare än Rävlidenproven för de kortare härdningstiderna, 7 till 14 dagar. Vid osäkerhet om Rävlidenproven verkligen gått i brott eller bara snedbelastats och trycktestet avbrutits av den anledningen, antecknades första resultat och provet testades därefter igen. Detta prov kunde uppvisa enaxiell tryckhållfasthet upptill 80% av första resultatet. Proceduren kunde upprepas flera gånger om för att säkerställa att provet gått i brott, med en minskande hållfasthet för varje omgång. Detta duktila beteende uppvisade inte Kristinebergssproven, även om brottytan inte var blottad var hållfastheten väldigt låg (0,05-0,1 MPa) vid ett andra trycktest, och brottytan var väl synlig vid efteråt. Ju längre härdning för Rävlidenproven, desto tydligare blev brottytan. Ett duktilare beteende i återfyllnaden underjord kan tänkas vara fördelaktigt.

Teorin bakom hållfasthetskraven vid panelbrytning utgår inte från att fyllningen ska bära upp last. Fyllningen ska hjälpa bergmassan att bära upp sig själv genom att minska öppet takspann och motverka utfall ur taket. Segare brott i återfyllningen underlättar valvverkan i berget med tanke på att eventuella kilar inte har möjlighet att falla ut. Det ger möjlighet till att utrymma panelen innan utfall från fyllningen sker givet att brottet upptäckts. Sprödare brott skulle ge utfall ur återfyllningen rätt snabbt.

Härdningstid

Rävlidenproven visade högre hållfasthet efter 7 dagar, samt en högre hållfasthetstillväxt jämfört med Kristinebergsproven, 35% kontra 12% tillväxt från 7 till 14 dagar. Därefter minskade hållfasthetstillväxten för Rävlidenproven för varje 7-dagarsperiod, 11% vid 21 dagar och slutligen 9% för 28 dagar.

För Rävlidenprov med 4% bindemedel var tillväxten 15% för 28 dagars härdning jämfört med 14. Provet nådde inte hållfasthetsgränsen på 0,2 MPa efter 28 dagar, utan resulterade i

0,169 MPa. Högre bindemedelshalter tyder på att längre härdningstid behövs, och vice versa att prov med lägre bindemedelshalt kräver mindre tid för att nå sin sluthållfasthet baserat på denna tillväxt.

Bindemedelshalt

Rävlidenproven uppvisade ett linjärt samband för hållfasthet gentemot bindemedelshalt i intervallet 4-12% b.m. och härdningstiden 14 dagar. En procent högre bindemedelshalt gav ca 0,1 MPa högre tryckhållfasthet inom intervallet. Jämförelsevis med Kristinebergsproven hade Rävlidenproven en högre hållfasthet vid 8% bindemedel (0,481 kontra 0,338 MPa). En ökning från 8% till 12% bindemedel resulterade i en tillväxt på 108% i enaxiell tryckhållfasthet för båda serier. Provserierna med 12% b.m. placerar sig långt över hållfasthetsgränsen på 0,2 MPa för igensättningsbrytning med 6 meter brytbredd (1,00 MPa för G2R respektive 0,703 MPa för G2K).

Generellt indikerar dessa resultat att receptet går att optimeras givet att dessa resultat går att återskapa underjord. Bindemedel står för majoriteten, uppemot 75%, av totala kostnaden för en återfyll (Kasap et. al, 2022). Bara ett par procentenheter mindre bindemedel kan sänka operativa kostnader vid igensättningsbrytning kraftigt.

Tillsatser

För att undersöka tillsatsers påverkan på hållfastheten utfördes två försöksuppställningar: dels för att se hur ett prov med tillsatser utvecklar hållfasthet över tid jämfört med ett referensprov av vardera sand, utan tillsatser. Den andra kan ses som fortsättningen av screeningen under *5.2.1 Flytbarhet*. Rävlidenprov blandades tillsammans med tillsatserna som gav framträdande effekt vid screeningen. I dessa tre provuppställningar adderades tillsatser som påverkade bearbetbarheten, varvid de blandades till en högre fastgodsandel (69%).

I den första uppställningen antyddes att provet med hybridprodukten MF905 uppnådde sluthållfasthet tidigare än referensprovet. Knappt någon hållfasthetstillväxt för 14-dagarsprovet kontra 7-dagarsprovet uppmättes (4% tillväxt). Samtidigt visade den betydligt högre styrka vid 7 dagar än vad båda referensprov uppvisade (21% högre än G2R, 52% än för G2K). Samtidigt ska inte viskositetsförändrande egenskapen förringas i detta läge. Fastgodsandelen låg på 69% men bedömdes hade flytegenskaper av en slurry med fastgodsandel i låga 60%-tal. Trots detta behölls sluthållfastheten i stort sett.

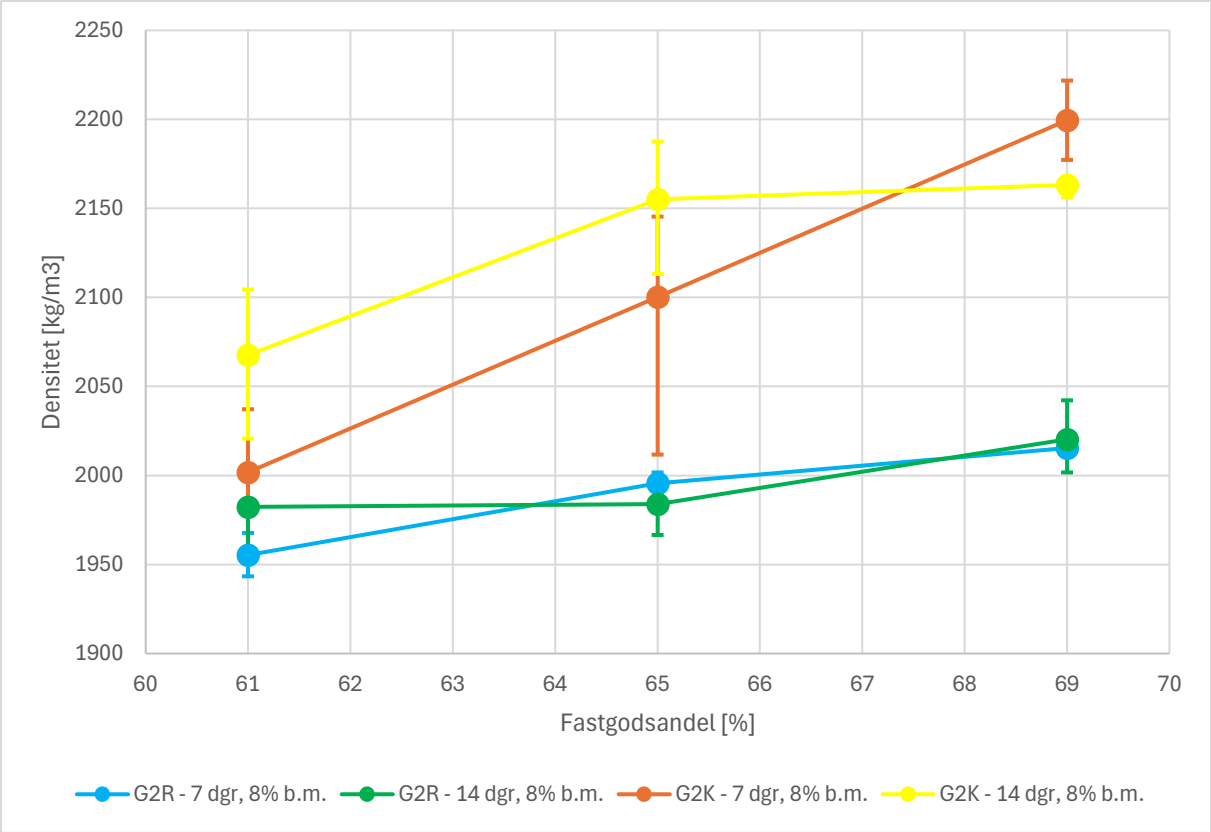
Den andra provuppställningar med diverse tillsatser uppvisade liknande hållfastheter som för referensprovet av Rävlidensand. Högst tryckhållfasthet efter 7 dagar hade serien med 350

g/ton av MF905 (hybridprodukt) och 150 g/ton av MF308 (sättningsförbättrande tillsatsmedel) på 0,533 MPa. Lägst resultat gav serien med VMA, 500 g/ton MF501, på 0,412 MPa. Referensproven av Rävlidensand uppvisade 0,471 MPa och motsvarande värde för Kristinebergsproven var 0,283 MPa. Även om förändringen i hållfasthet kontra referensprovet var ytterst liten, bör inte förändringen i flytbarhet förringas. En slutsats man kan dra av addering av viskositetsförändrande tillsatsmedel är snarare att hydraulfyllen behåller sin tryckhållfasthet.

Möjligheten finns att kombinera tillsatsmedel, exempelvis som i två av provuppställningarna. Där adderades både flyttillsatsmedel (MF501 & MF905) tillsammans med ett medel som ska förbättra sättningsegenskaperna hos provet, MF308. Att upptäcka vilka flockningsmedel som fungerar med denna typ av sand, vatten och cement är svårare att avgöra manuellt. Detta tillsatsmedel gav en förtjockande effekt på slurryn, och efter 24 timmar blödde inte provet vatten vid screeningen. Denna effekt visades inte för något annat medel, varvid detta medel valdes. En grundlig kemisk undersökning av ingredienserna hade kunnat visa om detta medel är lämpligt givet sanden, cementen och processvattnet som används. Att MF308 påvisade förtjockande effekt på slurryn behöver inte betyda att den är olämplig ur ett hydrauliskt perspektiv. Tillsatsmedel kan adderas i olika delar av systemet. Viskositetsförändrande medel vill man addera i tidigaste stadiet, helst innan flödet går in i rörsystemet. Detta underlättar transporten genom systemet fram till brytningsrummet. Ett flockningsmedel med förtjockande effekt vill man tillsätta så nära brytningsrummet som ska fyllas som möjligt. Detta reducerar sträckan som förtjockade flödet ska färdas, och underlättar på så vis för rörsystemet. Vid addering av tillsatser ska syftet med tillsatsen först definieras, vad vill man uppnå. Detta kan exempelvis vara:

- Underlätta hydrauliskt (förbättra flytegenskaper vid tjockare slurry).
- Förhindra skiktning, stabilisera sättningsprocessen av deponerad slurry.
- Påskynda härdningsprocessen, snabbare tillgång till malm.

Densiteten tenderade, liksom enaxiell tryckhållfasthet att vara kopplad med fastgodsandelen, d.v.s. en vattnigare blandning gav generellt lägre densitet på CHF:en. Utöver fastgodsandelen så tenderar skrymdensiteten att öka ju längre provet får härda. Beräknad densitet beroende på fastgodsandel visualiseras nedan i Figur 27.



Figur 27: Densitet kontra fastgodsandel.

Hållfasthetskrav på hydraulfyll är kopplad till densiteten på återfylningen, där högre densitet (egenvikt på blocket) kräver högre enaxiell tryckhållfasthet. Beräkningsvärdet är i nuläget 2000 kg/m^3 vilket är i paritet för medelvärdet i Rävlidenserierna (1980 kg/m^3) men samtidigt en bit under medelvärdet för Kristinebergsserierna (2131 kg/m^3).

5.2.4 Segregationstest

Försöksuppställningen vid segregationstestet hade liknande förutsättningar som råder underjord i nuläget. Fastgodsandelen blandades till 60 viktprocent och ingen bottendränering tilläts. På fyllrummen sker den största dräneringen från ytan. En intressant upptäckt gjordes då kornstorleksanalys skulle göras för Kristinebergsprovet, vid höjden 60 cm. Då provet torkats i ugn i två dygn och skulle ”malas” för att bryta cementbindningarna påträffades nästan ren cement, visualiserat nedan i Figur 28. Det är en distinkt skillnad i nyans mellan detta prov och övriga provhöjder för G2K-sand, där detta lager har frångått den naturliga sandfärgen som annars finns i Kristinebergssanden.

Figur 28: Segregationstest, G2K vid höjden 60 cm.

Ren cement påträffades inte i någon av de övriga provuppställningarna. Denna upptäckt stärker tesen om att materialet skiktar sig vid häftig deponering av hydraulfyll med lägre fastgodsandel.

Noterbart är att det är referensproven med G2R-sand som står för den kontinuerligt lägsta graden av segregering. Proven med tillsatsmedel visade störst segregering i botten av proven medan referensproven visade större segregering i toppen av provet. Tillsatsmedlen antas därmed ha en effekt på placeringen av slurryn. Att kunna utföra tryckhållfasthetstester på alla prov (som tanken var från början) hade varit väldigt intressant att se. På detta sätt hade cementen kunnat spårats, och se om den följer dräneringsvattnet. En annan aspekt som hade varit intressant att undersöka är hur segregering varierar vid olika fastgodsandelar.

Graderingstalen är mer eller mindre konstanta genom alla provhöjder med tanke på att segregeringen var allmänt låg. Kristinebergprovet hade överlägset högst graderingstal, kopplat till kornstorleksfördelningen och att Kristineberg har fler grövre partiklar i sanden.

6 SLUTSATS

Rävliden visar god potential till att ersätta Kristinebergssanden som primär återfyllnadssand, baserat på genomförda laboratorietester och undersökningar av materialparametrar. Materialparametrarna och laboratorietesterna är utförda av en Rävlidenkampanj och slutsatsen grundar sig i att denna återvinningssand är möjlig att upprepa.

Laboratorietester

Att blanda ett prov i taget och bara tillsätta material som ryms i en provform gav låg spridning på enaxiell tryckhållfasthet för respektive försökuppställning/serie. Rävlidenproven påvisade följande resultat:

- Högre enaxiell tryckhållfasthet efter 7 dagar samt högre hållfasthetstillväxt till 14 dagar än Kristinebergsproven. 4% bindemedel gav knappt någon tillväxt mellan 14-28 dagar, och når inte hållfasthetskravet.
- Högre fastgodsandel i receptet ger högre hållfasthet. Största ökningen sker vid 65 viktprocent och uppåt. Högre fastgodsandel får flertalet andra positiva effekter.
- Vid addering av flyttillsatsmedel behålls tryckhållfastheten. Vid addering av placeringstillsatsmedel uppnås sluthållfastheten snabbare.
- Relativt linjär ökning av hållfasthet inom intervallet 4-12% bindemedel för Rävlidenproven och 14 dagar härdning. Rävlidenprovet passerar hållfasthetskravet 0,2 MPa vid ca 4,5% bindemedel och uppvisar högre hållfasthet än Kristinebergsproven vid samma uppställning.

Generellt tyder resultaten på att receptet går att optimera givet att resultaten går att återskapa underjord. En parameter som framför allt skulle vara fördelaktig att optimera är fastgodsandelen. Dels lägre vattenhanteringskostnader (mindre vatten att omhänderta, pumpslitage, elkostnader, ställtid för dränering), dels ökar hållfastheten. Detta skulle ge möjlighet att sänka bindemedelshalten och spara på operativa kostnader.

Tillsatser som påverkar egenskaperna i hydraulfyllen på olika sätt. Hållfastheten behålls även vid användning av flyttillsatsmedel. Med placeringstillsatsmedel eller hybridtillsatsmedel påverkas sättningen av hydraulfyllen i positiv bemärkelse, framför allt snabbare härdningsprocess. Detta kan ge snabbare tillträde till omkringliggande malm. Vid addering av tillsatser i en hydraulfyll är det viktigt att först definiera effekten man vill uppnå.

- Rävlidensanden visade inte lika hög tendens till segregering som Kristinebergssanden. Sättningsförbättrande tillsatsmedel påverkar skiktningen i återfyllnaden.

- Marshkonen är lämplig till viskositetsmätning i fastgodsandelar upp till 65 viktprocent. Över detta hann materialet i konen sätta sig och täppa igen mynningen innan fingret avlägsnades.

Materialparametrar

- Vid cyklonisering av Rävlidensanden uppfylls kriterier för hydraulisk återfyll (inga partiklar över 1000 μm, mindre än 10% under 10 μm). Lägre andel grova partiklar än Kristinebergssanden vilket leder till lägre gradering i sanden. Skrymdensitet och packningsgrad vid lagring av denna sand är märkbart lägre än G2K.
- Densiteten på Rävlidensanden gav ett medelvärde på 3,16 ton/m^3 vilket är jämförelsevis lägre än Kristinebergssanden (ca 3,55 ton/m^3). Detta leder till att en blandning av samma fastgodsandel sett till vikt kommer att uppfattas tjockare och vara mer trögflytande för Rävlidensanden. Ett ton G2R-sand återfyller av samma anledning större volym än ett ton av G2K-sand. Det kan vara lämpligt att anta parametern fastgodsandel sett till volym som parameter om sandar med olika densitet ska användas i samma anläggning.
- Permeabilitetsprov med falling-head-metoden påvisar en tillräckligt bra permeabilitet för Rävlidensanden på drygt 15 cm/h (10 cm/h anses acceptabelt).

6.1 Vidare studier

- Ett fullskaligt test för att utreda hur materialet beter sig i anläggningen, exempelvis i siktar, mixer och i rörsystemet. Detta hade varit nödvändigt för att säkrare kunna svara på forskningsfrågan ”om Rävlidensanden kan användas till hydraulfyll?”. Laboratorieundersökningarna gav endast indikationer på att detta är möjligt, baserat på likheter och skillnader gentemot G2K-sand.
- Hydrauliska egenskaper och flödesmekanik är bara övergripande undersökt och diskuterat. Viskositetsmätningar med reometer, liksom hydraulic grade line-studie på anläggningen och gruvan hade varit material för vidare undersökning.
- Tillsatser har en noterbar påverkan på egenskaperna i slurryn, framför allt gällande reologin. Grundlig kemisk undersökning av sanden, processvattnet samt cementen hade varit användbart här för att utreda vilka tillsatsmedel som är lämplig. Screeningen som utfördes gav som sagt bara en fingervisning. Även här hade viskositetsmätning med reometer varit lämpligt för att få mer pålitliga värden än Marshkonen.

- I detta examensarbete undersöktes primärt hållfastheten, men en intressant notering gjordes. Rävlidenprov, framför allt med lägre härdningstid, uppvisade en seghet vid brott och en typ av residualhållfasthet. Kristinebergsproven var betydligt sprödare.
  En djupare undersökning av plastiska parametrar och deras påverkan på brottmekaniken för hydraulisk fyll hade varit intressant.
- Grundlig undersökning på tillverkningsprocessen av avfallssanden:
    - är denna kampanj representativ för Rävlidenfyndigheten eller kommer geologin förändras framöver?
    - Hur stor del cykloniserades bort och hur stor andel blev till avfallssand?
    - Är detta en produkt som anrikningsverket kan återskapa kontinuerligt?

7 REFERENSER

Al-Khafaji, A. W., Andersland, O. B. (1992). Geotechnical Engineering and Soil Testing.

Almahdawi, F. H. M., Al-Yaseri, A. Z., Jasim, N. (2014). Apparent Viscosity Direct from Marsh Funnel Test. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 15, pp. 51-57.

Bergman, A. (2022). Hållfasthetskrav cementstabiliserad fyll. Boliden Mineral AB. [Intern rapport].

Dalcé, J., Li L., Pengyu Y. (2019). Experimental Study of Uniaxial Compressive Strength (UCS) Distribution of Hydraulic Backfill Associated with Segregation, *Minerals 9*, no. 3: 147.

Dorricott, M., Grice, A. (2002). Proceedings Green Processing 2002, *The Australasian Institute of Mining and Metalurgy*: Melbourne, pp. 265-270.

Grice, A. (1998). Underground Mining With Backfill. *The 2nd Annual Summit – Mine Tailings Disposal Systems*, Brisbane, pp. 1-14.

Intranet. (u.å.1). G1R Kartor. Boliden Mineral AB. [Internt dokument]. Hämtad 2024-09-13.

Intranet. (u.å.2). G1R Produktionskartor. Boliden Mineral AB. [Internt dokument]. Hämtad 2024-09-13.

iPak Report. (2024). *Återfyllnadssand*. Boliden Mineral AB. [Intern hemsida]. Hämtad 2024-09-30.

Kasap, T., Yilmaz, E., Sari, M. (2022). Effects of mineral additives and age on microstructure evolution and durability properties of sand-reinforced cementitious mine backfills, *Construction and Building Materials*, Volume 352.

Larsson, P. (2022) G9 – Hållfasthetskrav och recept på pastafyll i Garpenberg. Boliden Mineral AB. [Intern rapport]

Martic, Z, Gelson, J., Brás, H., Xu, Q., Brosko, W. (2014). New perspectives for cemented hydraulic fill with chemical technologies. *Mine Fill 2014*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 295-308.

Martic, Z., Gelson, J., Champa, J., Knight, B. (2011). Admixtures in backfill applications for cost and performance benefits. *Paste 2011: Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 523-536.

Mitchell, R., Olsen, R., Smith, J. (1981). Model studies on cemented tailings used in mine backfill. *National Research Council of Canada*.

Mudtest. (2022). Marsh Funnel – Instruction Manual. Hämtad 2024-09-13 från: https://www.mudtest.com/media/cement/downloads/en/instruction_manual_marsh_funnel.pdf

Pitt, M. J. (2000). The Marsh Funnel and Drilling Fluid Viscosity: A New Equation for Field Use. *SPE Drill & Completion 15*, pp. 3-6.

Potvin, Y., Thomas, E., Fourie, A. (2005). *Handbook on Mine Fill*. Australian Centre for Geomechanics.

Qiu, H., Liang, C., Tu, B., Liu, L., Zhang, F., Lv, W. (2022). Study on mechanical properties of cemented backfill with different mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, Volume 367.

Rankine, R., Pacheco, M., Sivakugan, N. (2007). Underground Mining with Backfills. *Soils and Rocks*, São Paulo, 30(2): pp. 93-101.

Saw, H., Villaescusa, E. (2011). Research on the mechanical properties of minefill: influences of material particle size, chemical and mineral composition, binder and mixing water. *Minefill 2011*, The South African Institue of Mining and Metallurgy, Cape Town, pp. 143-152.

Saw, H. & Villaescusa, E. (2013). Geotechnical properties of mine fill. *Proceedings of the 18th Southeast Asian Geotechnical Conference: Advances in Geotechnical Infrastructure*. Geotechnical Society of Singapore, Singapore, pp. 787-792.

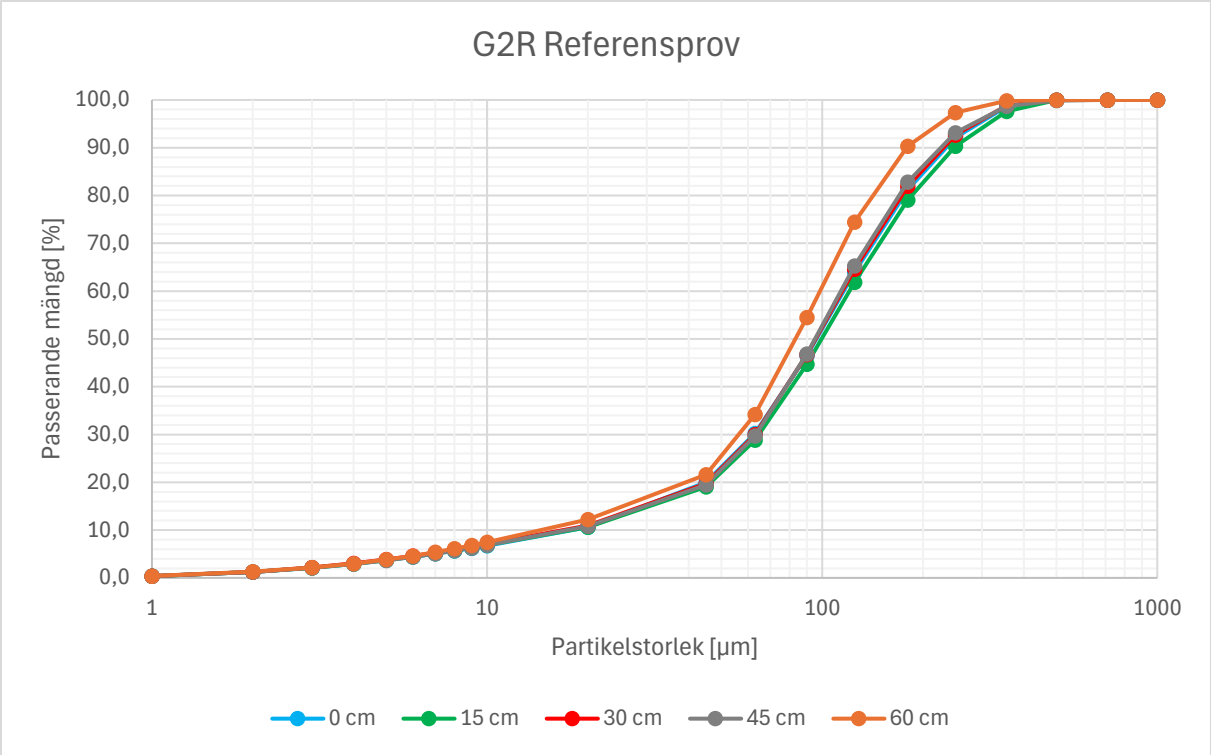
Yu, H., Li, S., Wang, X. (2021). The Recent Progress China Has Made in the Backfill Mining Method, Part I: The Theory and Equipment of Backfill Pipeline Transportation. *Minerals II*, no. 11: 1274.

8 APPENDIX

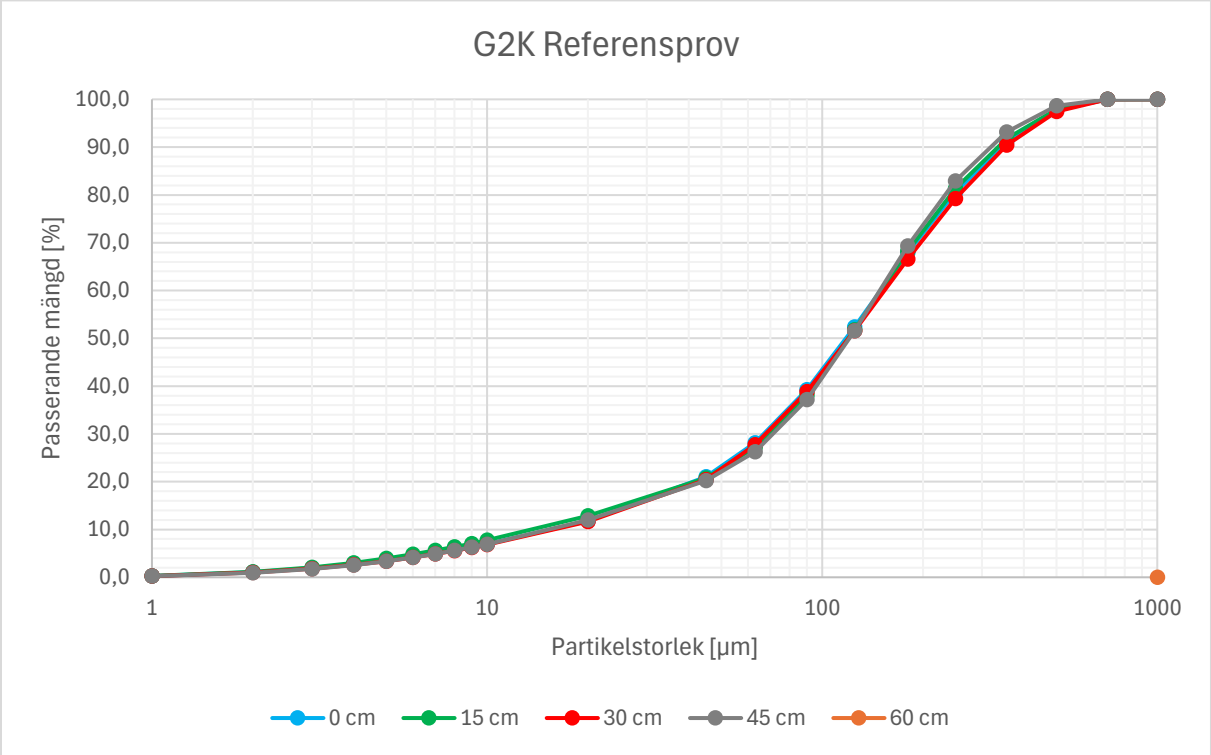
8.1 Appendix A – Kornstorleksfördelning från Malvern

Tabell A 1: Malvernresultat, G2R & G2K 20240617.

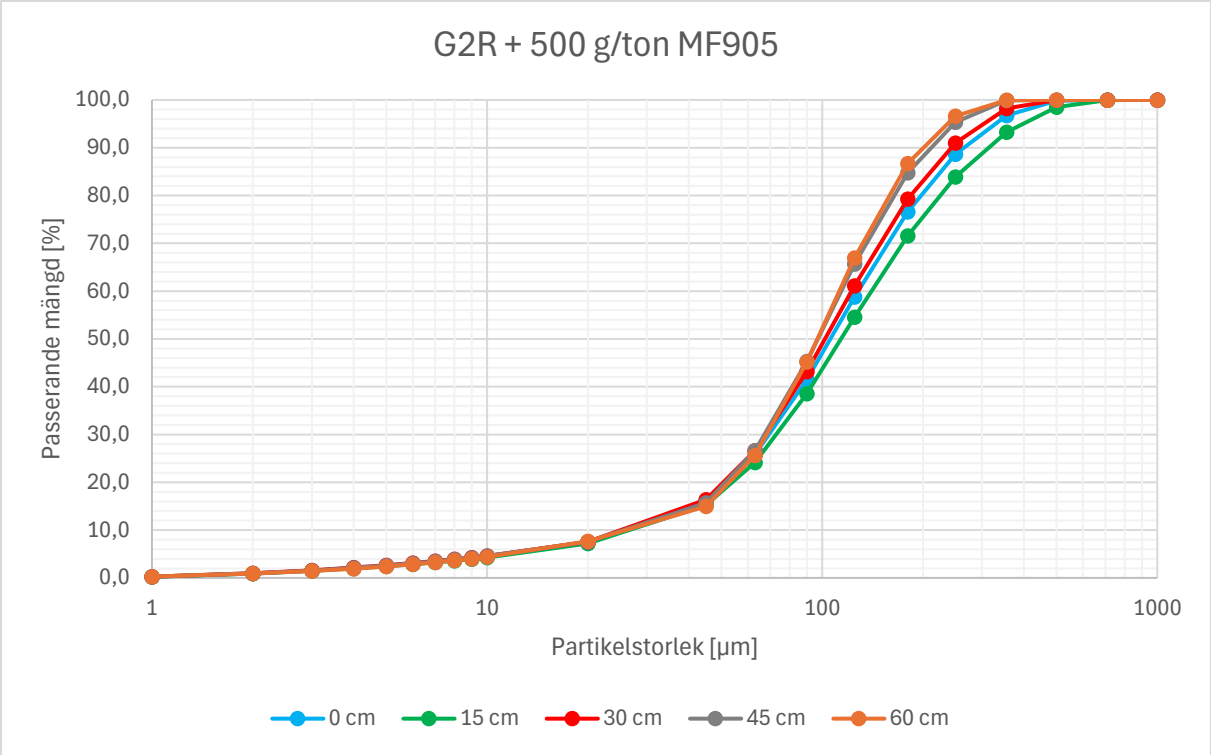
Record Number	G2R 20240617		G2K
Sample Name	Totalt avfall	U.L sekundärbatteri	U.L sekundärbatteri
Dx (95)	163,6	254,4	445,3
Dx (80)	86,7	162,0	271,0
Dx (50)	31,2	92,3	131,8
Dx (10)	2,9	21,1	17,3
Result Below (2000) µm	100,0	100,0	100,0
Result Below (1400) µm	100,0	100,0	100,0
Result Below (1000) µm	100,0	100,0	100,0
Result Below (710) µm	100,0	100,0	100,0
Result Below (500) µm	100,0	100,0	97,2
Result Below (355) µm	100,0	99,4	89,2
Result Below (250) µm	99,5	94,6	76,8
Result Below (180) µm	96,5	84,5	63,2
Result Below (125) µm	89,5	66,9	47,9
Result Below (90) µm	81,0	48,6	36,3
Result Below (63) µm	70,8	31,5	27,1
Result Below (45) µm	60,9	20,5	21,0
Result Below (20) µm	37,5	9,6	11,3
Result Below (10) µm	23,3	5,5	6,1
Result Below (9) µm	21,7	5,1	5,5
Result Below (8) µm	20,0	4,7	5,0
Result Below (7) µm	18,2	4,3	4,4
Result Below (6) µm	16,4	3,9	3,8
Result Below (5) µm	14,5	3,5	3,2
Result Below (4) µm	12,5	3,1	2,6
Result Below (3) µm	10,2	2,6	1,9
Result Below (2) µm	7,0	1,8	1,2
Result Below (1) µm	2,4	0,4	0,3



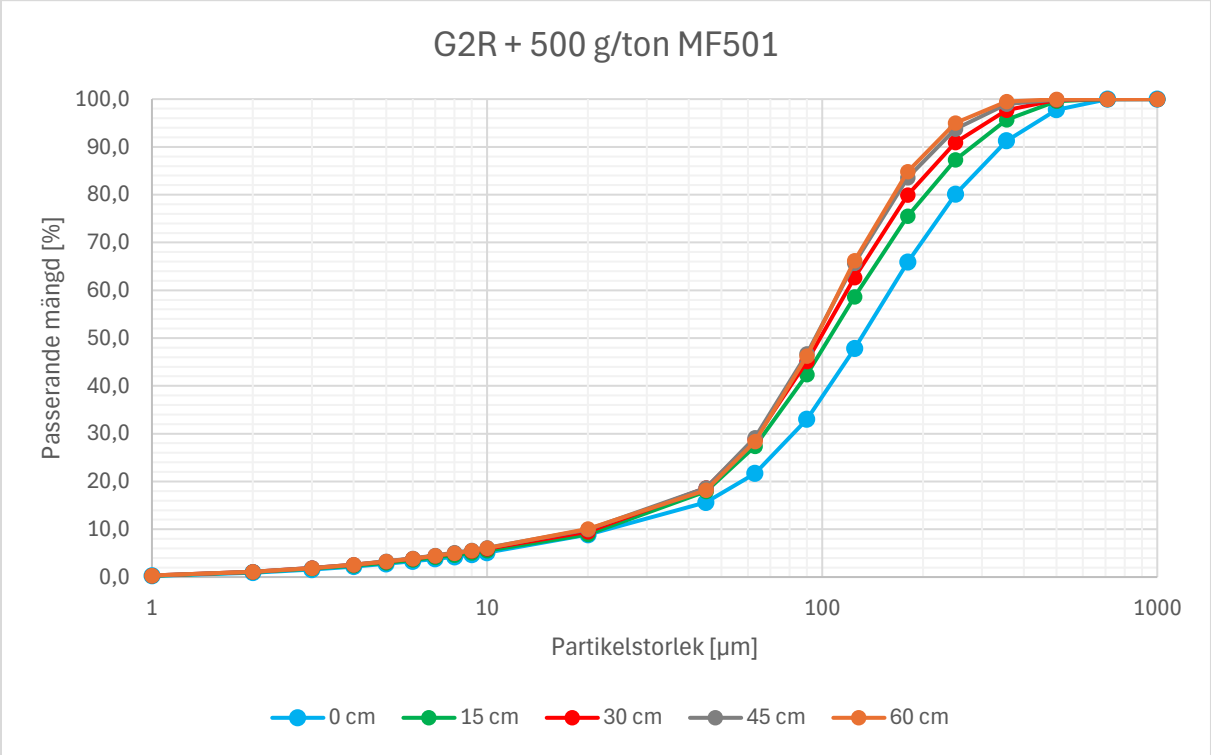
Figur A 1: Kornstorleksfördelning, segregationstest G2R.



Figur A 2: Kornstorleksfördelning, segregationstest G2K.



Figur A 3: Kornstorleksfördelning, segregationstest G2R + MF905.



Figur A 4: Kornstorleksfördelning, segregationstest G2R + MF501.

8.2 Appendix B – Densitetsrapporter från AccuPyc II 1340

AccuPycII 1340 V1.05
Serial Number: 1476
Density and Volume Report

Sample ID: 1
Sample Mass: 20.2900 g
Temperature: 24.4 °C
Number of Purges: 5
Cell Volume: 37.7020 cm3

Started: 16/08/24 08:23:58
Completed: 16/08/24 08:33:07

Equilibration Rate: 0.0050 psig/min
Expansion Volume: 74.1370 cm3

Cycle#	Volume cm3	Deviation cm3	Density g/cm3	Deviation g/cm3	Elapsed Time	Temperature °C
1	6.3775	0.0015	3.1815	-0.0007	0:05:01	24.4
2	6.3745	-0.0015	3.1830	0.0007	0:07:04	24.4
3	6.3760	0.0000	3.1822	-0.0000	0:09:01	24.4

Average Volume: 6.3760 cm3
Average Density: 3.1822 g/cm3

Standard Deviation: 0.0012 cm3
Standard Deviation: 0.0006 g/cm3

Figur B 1: Densitetsrapport, prov 1.

AccuPycII 1340 V1.05
Serial Number: 1476
Density and Volume Report

Sample ID: 2
Sample Mass: 20.3500 g
Temperature: 24.6 °C
Number of Purges: 5
Cell Volume: 37.7020 cm3

Started: 16/08/24 08:38:09
Completed: 16/08/24 08:48:28

Equilibration Rate: 0.0050 psig/min
Expansion Volume: 74.1370 cm3

Cycle#	Volume cm3	Deviation cm3	Density g/cm3	Deviation g/cm3	Elapsed Time	Temperature °C
1	6.5026	-0.0121	3.1295	0.0058	0:06:07	24.5
2	6.5197	0.0050	3.1213	-0.0024	0:08:04	24.5
3	6.5217	0.0070	3.1203	-0.0034	0:10:12	24.6

Average Volume: 6.5147 cm3
Average Density: 3.1237 g/cm3

Standard Deviation: 0.0086 cm3
Standard Deviation: 0.0041 g/cm3

Figur B 2: Densitetsrapport, prov 2.

AccuPycII 1340 V1.05
Serial Number: 1476
Density and Volume Report

Sample ID: 3
Sample Mass: 20.3200 g
Temperature: 24.6 °C
Number of Purges: 5
Cell Volume: 37.7020 cm3

Started: 16/08/24 08:54:14
Completed: 16/08/24 09:07:11

Equilibration Rate: 0.0050 psig/min
Expansion Volume: 74.1370 cm3

Cycle#	Volume cm3	Deviation cm3	Density g/cm3	Deviation g/cm3	Elapsed Time	Temperature °C
1	6.3796	-0.0004	3.1851	0.0002	0:07:23	24.6
2	6.3818	0.0018	3.1840	-0.0009	0:10:00	24.6
3	6.3787	-0.0014	3.1856	0.0007	0:12:49	24.6

Average Volume: 6.3800 cm3
Average Density: 3.1849 g/cm3

Standard Deviation: 0.0013 cm3
Standard Deviation: 0.0007 g/cm3

Figur B 3: Densitetsrapport, prov 3.

8.3 Appendix C - Fuktkvotsberäkningar

Tabell C 1: Fuktkvotsdata.

Hink nr.	Sand	m_{form}	$m_{före}$ (inkl. provform)	$m_{före}$	m_{efter} (inkl. provform)	m_{efter}	fuktkvot [%]
1	G2R	107,12	188,5	81,38	179,59	72,47	**12,3**
2	G2R	103,90	222,35	118,45	212,24	108,34	**9,3**
3	G2R	96,09	194,54	98,45	184,63	88,54	**11,2**
4	G2R	104,00	199,26	95,26	189,78	85,78	**11,1**
5	G2R	99,38	199,97	100,59	189,61	90,23	**11,5**
6	G2R	99,60	221,63	122,03	209,15	109,55	**11,4**
7	G2R	103,80	234,75	130,95	222,96	119,16	**9,9**
8	G2R	108,97	178,16	69,19	170,73	61,76	**12,0**
9	G2K	108,10	209,42	101,32	199,32	91,22	**11,1**
10	G2K	101,15	236,45	135,30	226,13	124,98	**8,3**
11	G2K	98,45	195,62	97,17	186,36	87,91	**10,5**
12	G2K	108,58	219,62	111,04	210,28	101,7	**9,2**
13	G2K	99,59	206,25	106,66	197,18	97,59	**9,3**
14	G2K	176,39	285,84	109,45	276,00	99,61	**9,9**
15	G2R	96,23	170,99	74,76	166,98	70,75	**5,7**
16	G2R	103,96	167,42	63,46	163,5	59,54	**6,6**
17	G2R	99,54	172,02	72,48	167,2	67,66	**7,1**
18	G2R	109,08	178,24	69,16	174,39	65,31	**5,9**
19	G2R	104,09	163,22	59,13	159,67	55,58	**6,4**
20	G2R	103,89	170,98	67,09	168,2	64,31	**4,3**
21	G2R	99,71	162,4	62,69	157,74	58,03	**8,0**
22	G2K	107,2	173,18	65,98	169,76	62,56	**5,5**

8.4 Appendix D – Provtryckningsdata

Tabell D 1: Recept för provserier, enaxiell tryckhållfasthet.

Nr.	Sand	Tillsats	Härdning [dagar]	b.m [%]	f.g [%]
1-3	G2K		7	8,0	65
4-6	G2K		14	8,0	65
7-9	G2K		7	12,0	65
10-12	G2K		14	12,0	65
13-15	G2R		7	8,0	65
16-18	G2R		14	8,0	65
19-21	G2R	MF 905	7	8,0	65
22-24	G2R	MF 905	14	8,0	65
25-27	G2R	30% MF 308, 70% MF 905	7	8,0	69
28-30	G2R	30% MF 308, 70% MF 501	7	8,0	69
31-33	G2R	MF 501	7	8,0	69
34-36	G2K		7	8,0	61
37-39	G2K		7	8,0	69
40-42	G2R		7	8,0	61
43-45	G2R		7	8,0	69
46-48	G2R		28	8,0	65
49-51	G2R		28	4,0	65
52-54	G2K		14	8,0	61
55-57	G2K		14	8,0	69
58-60	G2R		14	8,0	61
61-63	G2R		14	8,0	69
64-66	G2R		14	4,0	65
67-69	G2R		14	12,0	65
70-72	G2R		21	8,0	65

Tabell D 2: Tillsatsdosering.

Nr.	Tillsats 1:	d [g/ton]	Tillsats 2:	d [g/ton]
19-21	MF 905	500	-	0
22-24	MF 905	500	-	0
25-27	MF 905	350	MF 308	150
28-30	MF 501	350	MF 308	150
31-33	MF 501	500	-	0

Tabell D 3: Provtryckningsresultat.

Nr.	Sand	h [cm]	m [g]	$\rho \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\rho_{avg} \left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$UCS[MPa]$	$UCS_{avg}[MPa]$
1-3	G2K	20,0	3160	2012	2100	0,323	0,309
		19,9	3350	2143		0,239	
		20,0	3370	2145		0,366	
4-6	G2K	19,1	3170	2113	2155	0,341	0,338
		20,0	3400	2165		0,335	
		~~18,8~~	3230	2188		~~0,443~~	
7-9	G2K	19,6	3260	2118	2142	0,488	0,515
		19,0	3220	2158		0,467	
		20,0	3380	2152		0,589	
10-12	G2K	20,0	3490	2222	2219	0,708	0,703
		19,9	3490	2233		0,719	
		20,0	3460	2203		0,682	
13-15	G2R	20,1	3160	2002	1996	0,344	0,355
		20,0	3130	1993		0,376	
		20,0	3130	1993		0,344	
16-18	G2R	20,0	3130	1993	1984	0,500	0,481
		20,0	3130	1993		0,466	
		20,2	3120	1967		0,477	
19-21	G2R	20,1	3060	1938	1949	0,492	0,430
		20,1	3060	1938		0,423	
		20,1	3110	1970		0,376	
22-24	G2R	20,0	3100	1974	1955	0,465	0,448
		20,0	3080	1961		0,430	

		~~18,4~~	2790	1931		~~0,470~~	
25–27	G2R	20,0	3130	1993	2002	0,495	0,533
		20,0	3110	1980		0,527	
		20,1	3210	2033		0,578	
28–30	G2R	20,0	3090	1967	1967	0,445	0,435
		20,0	3100	1974		0,431	
		20,0	3080	1961		0,428	
31–33	G2R	20,0	3110	1980	1982	0,389	0,412
		20,0	3120	1986		0,423	
		20,0	3110	1980		0,424	
34–36	G2K	19,7	3080	1991	2002	0,137	0,139
		19,5	3120	2037		0,141	
		~~18,8~~	2920	1978		~~0,125~~	
37–39	G2K	20,0	3490	2222	2200	0,315	0,283
		20,0	3420	2177		0,250	
		–	–	–		–	
40–42	G2R	19,8	3040	1955	1955	0,336	0,353
		19,8	3060	1968		0,394	
		19,0	2900	1943		0,330	
43–45	G2R	19,6	3100	2014	2015	0,466	0,471
		20,1	3180	2014		0,490	
		20,0	3170	2018		0,456	
46–48	G2R	20,0	~~3020~~	~~1904~~	1999	~~0,550~~	0,579
		20,0	~~3090~~	~~1967~~		0,588	
		20,0	3140	1999		0,570	
49–51	G2R	20,0	3060	1948	1963	0,160	0,169
		20,0	3110	1980		0,179	
		20,0	3080	1961		0,167	
52–54	G2K	20,1	3190	2021	2068	0,179	0,202
		20,1	3280	2078		0,191	
		19,3	3190	2104		0,235	
55–57	G2K	19,9	3370	2156	2163	0,472	0,457
		20,1	3420	2166		0,475	
		19,8	3370	2167		0,423	
58–60	G2R	19,9	3100	1983	1982	0,500	0,485
		~~18,4~~	2830	1958		~~0,456~~	
		20,0	3150	2005		0,469	
61–63	G2R	20,1	3160	2002	2020	0,553	0,535
		20,2	3200	2017		0,508	
		20,2	3240	2042		0,545	
64–66	G2R	20,0	3120	1986	1977	0,145	0,147
		20,0	3100	1974		0,148	
		20,1	3110	1970		0,148	

67-69	G2R	20,0	3080	1961	1979	1,030	1,000
		19,7	3070	1984		1,014	
		20.0	3130	1993		0,957	
70-72	G2R	20,0	3060	1948	1961	0,554	0,532
		19,6	3040	1975		0,512	
		20,0	3080	1961		0,530	

8.5 Appendix E – Marshtest

Tabell E 1: Marsh viskosimetertest.

Prov:	f.g [%]	b.m. [%]	Dosering tillsatsmedel [% av b.m]	$\rho\ [\frac{g}{cm^3}]$	T [s]	Viskositet $[mPa * s]$
G2R	55	8	-	1,57	30	7,8
G2R	58	8	-	1,62	33	12,9
G2R	61	8	-	1,67	35	16,7
G2R	64	8	-	1,73	37	20,7
G2R	67	8	-	1,79	45	35,7
G2R	70	8	-	1,85	73	88,9
G2R + HRWR	55	8	3	1,57	30	7,8
G2R + HRWR	58	8	3	1,62	32	11,3
G2R + HRWR	61	8	3	1,67	34	15,0
G2R + HRWR	64	8	3	1,73	36	19,0
G2R + HRWR	67	8	3	1,79	43	32,1
G2R + HRWR	70	8	3	1,85	80	101,8
G2R + VMA	55	8	1	1,57	29	6,3
G2R + VMA	58	8	1	1,62	31	9,7
G2R + VMA	61	8	1	1,67	33	13,3
G2R + VMA	64	8	1	1,73	36	19,0
G2R + VMA	67	8	1	1,79	46	37,5
G2R + VMA	70	8	1	1,85	Inget resultat	
G2K	55	8	-	1,60	30	8,0
G2K	58	8	-	1,66	33	13,3
G2K	61	8	-	1,72	35	17,2
G2K	64	8	-	1,78	37	21,4
G2K	67	8	-	1,85	47	40,7
G2K	70	8	-	1,92	Inget resultat	

Figur E 1: Sista Marshtestet för var uppställning. Uppe till vänster: G2R (73% f.g.), uppe till höger: G2R + HRWR (73% f.g.), nere till vänster: G2R + VMA (70% f.g.) och nere till höger: G2K (70%).