

FRÅN KRYPNING TILL FLYGNING – LANDNINGSBANA I HAVET FÖR NY LUFTHAVN BODØ

Nils Gustafsson 1 ^A, Carl Wersäll 2 ^B, Håvard Olaisen Hagen 3 ^C

^A *Peab Anlegg*

^B *Kerberos Geoteknik*

^C *COWI*

SAMMANFATTNING

I projektet Ny Lufthavn Bodø lossålls ca 3 miljoner m³ berg, varav ungefär hälften fylls ut i havet för att skapa en ny landningsbana. Bergmaterialet är av varierande kvalitet och sönderfaller lätt, samtidigt som den nya landningsbanan är utsatt för stora nedbrytande krafter, såsom 2 m variation av havsnivån varje dygn på grund av tidvatten. Således fanns en oro för stora krypsättningar/egensättningar i sprängstensfyllningen, beroende på bland annat nedbrytning.

Genom ett omfattande utredningsprogram, bland annat bestående av två packningsförsök, utarbetades en strategi för fyllning och packning som kunde hålla krypsättningen inom rimliga gränser, samtidigt som framdrift i produktionen kunde säkras. Prognostisering av sättningarna gjordes utifrån erfarenheter presenterade i litteraturen i kombination med ingenjörsmässiga bedömningar. Efter utlagd fyllning mättes sättningarna och beräkningsmodellerna uppdaterades med hjälp av inledande resultat.

Projektet visar att krypsättning i sprängstensfyllning är ett reellt problem men att det kan hanteras och minimeras genom anpassad fyllning, packning och förbelastning. Resultaten från projektet motsäger även den gängse uppfattningen att egensättning i sprängstensfyllning ej går att beräkna, även om erfarenheterna från Bodø Lufthavn belyser vikten av modelluppdatering från sättningmätningar.

SUMMARY

In the project Ny Lufthavn Bodø, approximately 3 million m³ of rock are excavated, of which about half is placed in the sea to create a new runway. The rock material is of varying quality and degrades easily, while the new runway is exposed to significant degrading forces, such as a 2 m daily variation in sea level due to tides. Consequently, there was concern about large creep settlements in the blasted rock fill, depending, among other factors, on material degradation.

Through an extensive investigation program, including two compaction trials, a strategy for placement and compaction was developed that could keep creep

settlements within reasonable limits while ensuring continued production progress. Settlement predictions were made based on experience presented in the literature in combination with engineering judgment. After placement of the fill, settlements were measured and the calculation models were updated using the initial results.

The project demonstrates that creep settlement in blasted rock fill is a real issue, but that it can be managed and minimized through adapted placement, compaction, and preloading. The results also contradict the common perception that creep settlement in blasted rock fill cannot be calculated, although the experiences from Bodø Airport highlight the importance of model updating based on settlement measurements.

1 INLEDNING

Avinor utvecklar nya flygplatsen i Bodø där Peab Anlegg är upphandlad som entreprenör för bl.a. markarbeten. Projektet Ny Lufthavn Bodø genomförs som ett samverkansprojekt mellan Avinor och Peab med COWI som projektör och innefattar en ny landningsbana, taxibanor och uppställningsplatser för flygplan. För att möjliggöra detta krävs att nya landområden skapas genom utfyllning i havet. I projektet lossålls ca 3 miljoner m³ berg, varav cirka hälften fylls ut i havet för att skapa den nya landningsbanan. Det byggs också två broar för inflygningsljus ut i havet med en totallängd på 800 m, och en yta av 650 000 m² ska asfalteras. Projektet omfattar även rivning av norska försvarets tidigare anläggningar då en flygbas var placerad i Bodø. Rivningen är den största i Norges historia med ca 160 000 ton betong som har återanvänts i projektet.

Kontraktet är på ca 3,3 miljarder norska kronor. I denna kontraktsform har byggherren tillsammans med entreprenören Peab, underentreprenören LNS och projektören COWI utvecklat och optimerat lösningar för att tillsammans ta fram ett målpris för projektet. Den nya flygplatsen ska öppna för trafik 2029. Placering av den nya flygplatsen framgår i Figur 1 och utbredningen av sjöfyllningen visas i Figur 2 och Figur 3.

Ett projekt i den här storleksordningen placerat i vid den norska kusten och med projektets geologiska och geotekniska förutsättningar har givetvis skapat stora utmaningar för projektorganisationen med avancerad projektering som följd. Denna artikel kommer inte kunna belysa alla dessa utmaningar utan fokuserar på krypsättningar i sprängstensfyllningen utlagd i havet.

1.1 Geotekniska förutsättningar

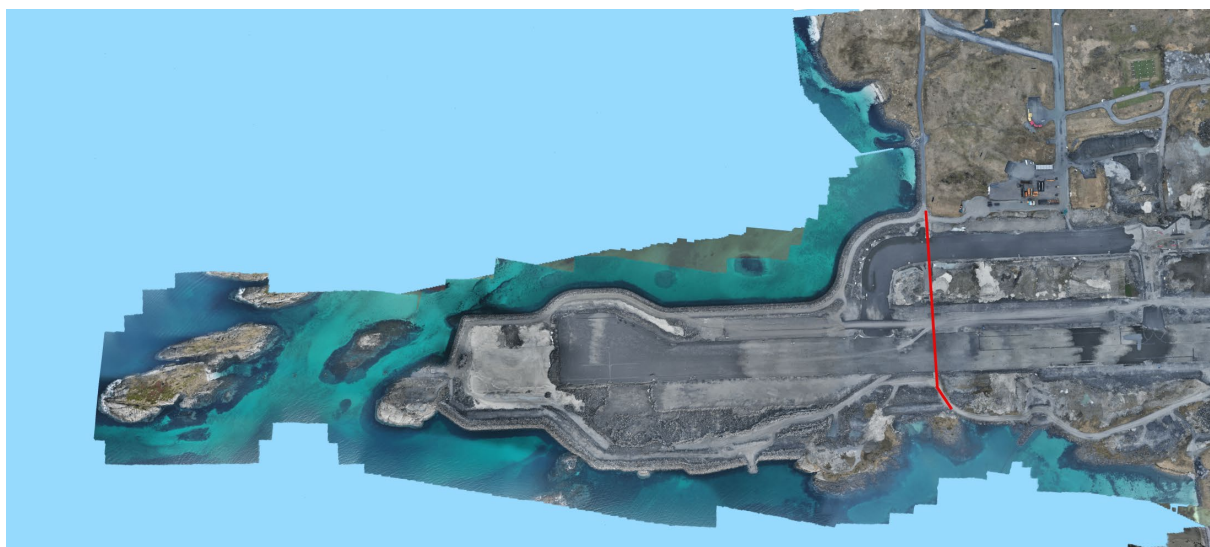
Området för ny landningsbana består av berg, jungfruliga massor i form av sand, tidigare fyllningsområden samt hav. Topografin i området är relativt flack med högsta berg på +25 och lägsta nivå med sjöbotten på -6. Nivå för landningsbanan blir på +6 till +9. Som framgår på profil i Figur 4 får den största fyllningen en mäktighet på 15 m och största skärningen ett djup på ca 15 m.



Figur 1 Befintlig flygplats till vänster i bild och den nya landningsbanan som tar form. (Foto: John Eivind Skogøy/Avinor)

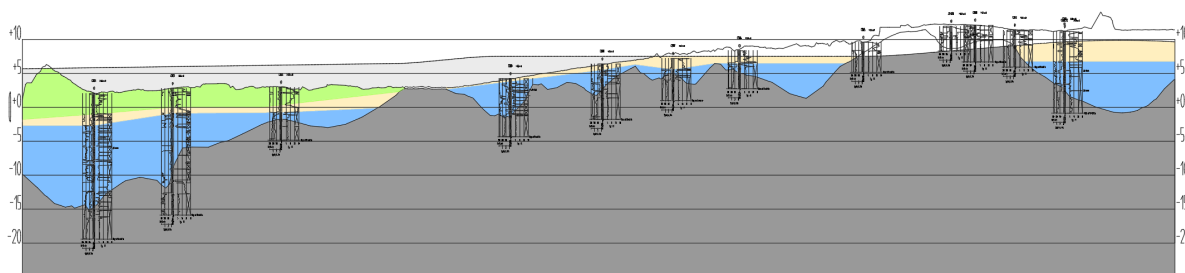


Figur 2 Flygfoto som visar området i väst innan utfyllning i havet påbörjades. Befintlig landningsbana kan ses i bildens överkant. Ungefärligt område för utfyllnad är markerat i rött. (Modifierat från finn.no)

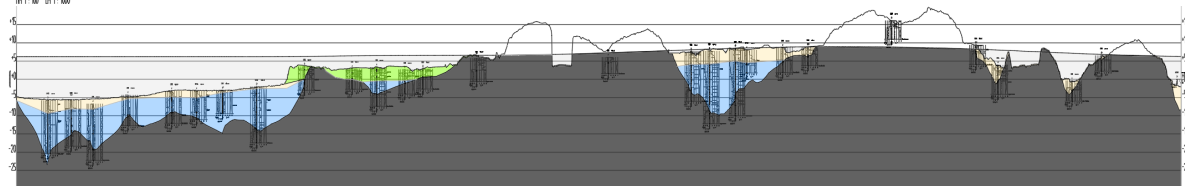


Figur 3. Flygfoto över sjöfyllningen i väst. Det har fyllts ut ca 800m. Röd linje markerar gamla strandlinjen.

Profil Taksebane Y
HM 1: 100 LM 1: 1000



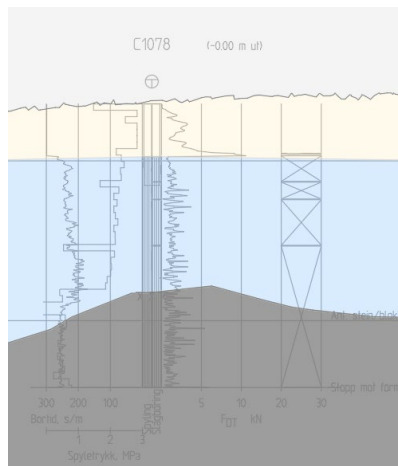
Profil Rullebane
HM 1: 100 LM 1: 1000



Figur 4 Tolkad jordlagerprofil.

1.1.1 Sjöfyllning i väst

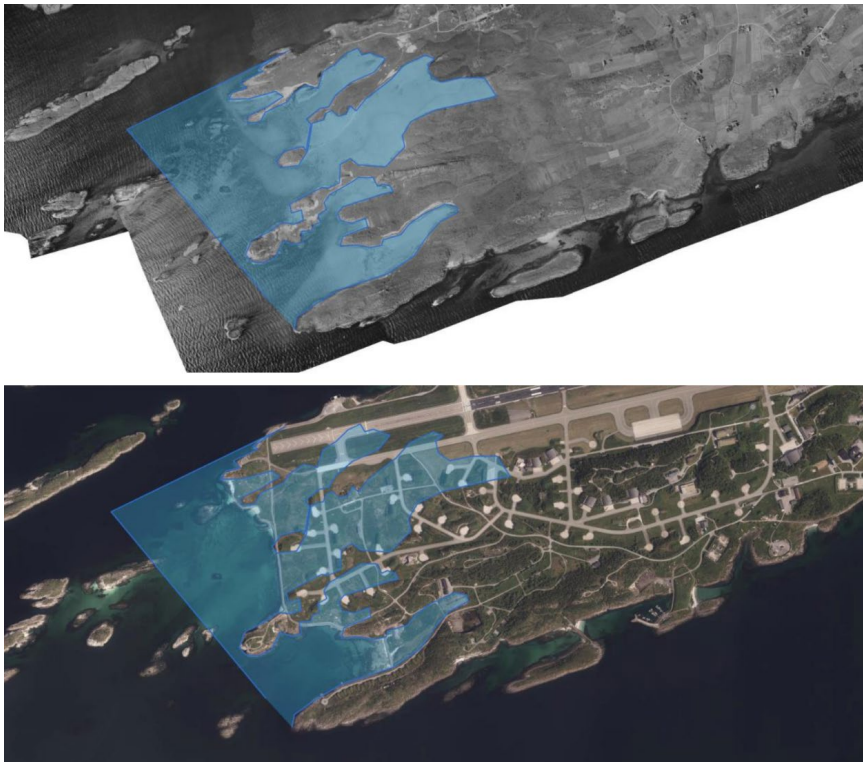
Utförda sonderingar visar att jordlagren i väst i huvudsak består av medelfast till löst lagrad friktionsjord. Registrerat jorddjup i totalsonderingar varierar mellan 0,2 och 14,5 meter. Jordlagren består generellt av ett lager med löst lagrad skalsand och siltig, lerig sand med mäktighet på 0–5 meter ovan lermorän (även kallad Bodølera) ner till berg. Det är osäkert om vissa borrhöjningar har träffat på sprucket berg eller om det är en större moränmäktighet i dessa områden. Ett exempel på en typisk jordlagerföljd i väst visas i Figur 5.



Figur 5 Totalsondering utförd i väst där den nya landningsbanan hamnar. Observera den svårtolkade gränsen mellan bottenmorän och berg.

1.1.2 Fyllning och skärning på land

Utförda sonderingar på land visar på en jordmättighet från 0 till 21,2 meter. Jordlagren på land består huvudsakligen av ett lager med skalsand ovanpå fast lagrad lermorän (Bodølera). Stora delar av områden på land är sedan tidigare utfyllt i omgångar. Fyllnadsmassorna varierar i egenskaper men består i huvudsak av friktionsjord. Omfattningen av tidigare utfyllnad framgår av Figur 6.



Figur 6 Två flygfoton som visar utbredning av den tidigare utfyllnaden som gjordes ca 1985-1990. (Modifierat från finn.no)

1.1.3 Sjöfyllning i öst

Borringarna i öst visar att grundförhållandena generellt består av ett lager med löst lagrad skalsand ovan blöt lera ner till berg. Leran är i vissa områden klassificerad som ”sprøbruddeire” vilket är en högsensitiv lera med kvickleregenskaper. För att säkerställa lokal- och områdesstabilitet och minska sättningsproblematiken för sjöfyllningen i öst är det utfört en massutskiftning/muddring ner till berg eller fast morän under hela sjöfyllningen i öst. En stor del av det nya landområdet i öst är inte för själva landningsbanan utan för säkerhetsområden och avvåkningsområden. Projektets stora utmaning med sättningskrav för landningsbanan är därför lokaliserat till sjöfyllningen i väst, även om massutskiftningen i sig bjudit på stora utmaningar för den geotekniska projekteringen.

1.1.4 Geologi

Bergarterna som går att finna i projektet och som har använts för fyllningen är kalkglimmerskiffer och tonalit med fördelning 90/10. Från labbförsök på Micro Deval och Los Angeles anses bergarten ha medel till lågt motstånd för krossning. Kalkglimmerskiffer har ett något högre motstånd mot krossning (Los Angeles) men något sämre motstånd till slitage (Micro Deval) än tonalit. Medelvärde på Los Angeles är 40 med en spridning mellan 26 och 51 samt medelvärde på 20 för Micro Deval med en spridning mellan 10 och 32.

Dessa egenskaper var kända innan projektets start och har legat till grund för den riskbedömning som har gjorts.

1.1.5 Sättningar

På grund av bergmaterialets benägenhet för nedbrytning fanns en risk för stora egensättningar samt en risk för nedkrossning i samband med packning. Losshållningen av berg var utformat för att få så stor andel stora block som möjligt eftersom ett erosionsskydd bestående av stenblock med vikt runt 10 ton skulle användas. En konsekvens av det är att berget fick relativt mycket sprickor vilket är negativt utifrån krossbenägenhet. Med tanke på de stora volymerna var det i projekteringen viktigt att finna en lämplig avvägning mellan hantering av sättningsrisker och framdrift i produktionen.

Till skillnad från väg- och järnvägsprojekt finns det för landningsbanor inga vedertagna sättningskrav att förhålla sig till. I stället fick projektet tillsammans utarbeta realistiska sättningskrav. Livslängden för flygplatsen är 40 år med en omasfaltering efter 20 år. Sättningskravet som beslutades blev 80 mm totalsättning på 20 år.

2 KRYPSÄTTNING I SPRÄNGSTENSFYLNING

Med krypsättning avses normalt långtidssättningar i lerjordar och dessa är vanligtvis betydligt större än egensättningar i fyllnadsmaterial. Vid avsaknad av oförstärkt lera

och stora fyllnadshöjder kan dock krypsättningen i fyllningen vara dimensionerande. Mekanismerna vid krypsättning i sprängstensfyllning är inte desamma som vid krypsättning i lera utan består av en kombination av tre mekanismer: omlagring, nedbrytning och urspolning.

Omlagring. Sprängstensfyllning består normalt av ett kornskelett av stenar och block med en stor luftporhalt i en slumpmässig konfiguration. Stenarna hindras att förflyttas och rotera genom inre friktion. När friktionen övervinns kan stenarna rotera och materialet omlagras till en tätare konfiguration, vilket ger upphov till sättning. Detta åstadkoms framför allt vid dynamiska och cykliska laster, och omlagringen minskar med tiden fyllningen blir tätare lagrad. Om fyllningen är packad sker omlagring vid packningen och materialet har således mindre benägenhet att omlagras i driftskedet. Om fyllningen är välgraderad minskar också benägenheten till omlagring då finare material fyller ut hålrummen mellan blocken och hindrar block från att rotera och förflyttas.

Nedbrytning. Då kontaktpunkterna mellan block i sprängstensfyllningen är mycket små utsätts dessa för mycket höga lokala spänningar. Det gör att bergmaterialet kan gå till brott så att blocken spricker och bryts ned till finare material. I samband med detta omlagras också materialet på samma sätt som beskrivet ovan, vilket ger sättningar. Som för omlagring så är nedbrytningen främst ett resultat av cykliska och dynamiska laster men kan även ske från statiska laster. Ju högre fyllning desto högre spänningar mellan blocken och således desto mer nedbrytning. I takt med att materialet bryts ned fylls hålrummen ut av finare material, vilket minskar lokala spänningar och saktar ner nedbrytningen. Den kan dock accelerera igen genom urspolning. Konceptet illustreras schematiskt i Figur 8.



Figur 7. Vänster: en fyllning med få kontaktpunkter och stora lokala spänningar, höger: en nedbruten fyllning med fler kontaktpunkter och lägre lokala spänningar. Genererat med AI (Google Gemini).

Urspolning. Sprängstensfyllning innehåller en viss mängd finmaterial. Detta skapas genom krossning, vilket kan ske vid sprängning, transport, utläggning, packning eller som ett resultat av nedbrytning. Finmaterialet fyller ut hålrum mellan blocken och minskar både omlagring och nedbrytning. Vatten i fyllningen kan spola ur finmaterialet så att fyllningen blir mer benägen för omlagring och nedbrytning.

Vattnet kan komma från nederbörd i form av nedträngande ytvatten eller från grundvattenvariationer.

I Bodø förekommer ca 2 m tidvattenvariation och eftersom landningsbanan fylls ut i havet utsätts fyllningen för dessa variationer. Resultatet blir ca 20 kPa cyklisk spänningsvariation varje dygn, vilket är mycket ogynnsamt för både omlagring och nedbrytning. Vidare orsakar den varierande havsnivån urspolning. Detta, i kombination med att bergmaterialet har en benägenhet för nedbrytning, ger ogynnsamma förutsättningar för krypsättning.

Utan åtgärd bedömdes krypsättningen bli högre än sättnings toleransen. För att hantera problematiken beslutades om ett åtgärdsprogram i form av ett optimerat packningsarbete i kombination med överlast. Då materialet var mycket krossningsbenäget var dock möjligheten till packning begränsad och en utredning för att bedöma optimalt packningsarbete var nödvändig.

2.1 Prognostisering av sättning

Även om krypsättning i sprängstensfyllning är ett reellt problem i många projekt finns begränsad erfarenhet i litteraturen. En stor del av det som finns dokumenterat och publicerat behandlar jordfyllnadsdammar där fyllnadshöjden normalt är betydligt större och kan uppgå till 100 m. I de norska handböckerna N-V220 och N-V221 finns riktvärden på 0,1% sättning av den totala fyllnadshöjden för packat överbyggnadsmaterial, 0,5% för fyllning utlagd lagervis och 1,0% för ändtippad fyllning.

Eftersom den nedre delen av fyllningen i Bodø (under vatten) utläggs med ändtippning och den övre delen av fyllningen packas i endast begränsad omfattning, samt eftersom materialet har en benägenhet till nedbrytning och tidvatten orsakar spänningsvariationer och urspolning, bedömdes att sättnings toleransen skulle överstigas utan åtgärder.

En metod för att uppskatta långtidssättning i sprängstensfyllning som förekommer i litteraturen är den enligt Sowers et al. (1965). Den anger att sättningen kan uppskattas genom

$$S = \alpha \cdot H \cdot \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

där S är sättningen mellan tidpunkterna t_1 och t_2 , beräknade från när sättningen började (t_0) och H är fyllningens mäktighet. Konstanten α anger storleken på den sättning i förhållande till fyllnadshöjden som sker för varje tiopotens av tiden. Till exempel, om $\alpha = 0,5\%$, fås 0,5% sättning mellan år 1 och år 10, och ytterligare 0,5% mellan år 10 och år 100. Det Sowers ekvation egentligen säger är att sättningen är konstant med logaritmen av tiden. Svårigheten kommer när modellen ska tillämpas för prognostisering utan projektspecifika sättningsmätningar. Den första osäkerheten beror på att ansätta tiden då sättningarna påbörjas (t_0). Denna får stor påverkan på det beräknade sättningsförloppet. Normalt antas t_0 vara den tidpunkt då fyllningen har

uppnått halva fyllnadshöjden, men detta är naturligtvis en grov förenkling. Den andra, och mer betydelsefulla, osäkerheten är ansättandet av parametern α . Mätningar, som finns redovisade i litteraturen, och erfarenheter från diverse projekt uppvisar mycket stora variationer i α . Detta är naturligt då varje projekt är unikt i fyllnadsmaterial, fyllnadshöjd, utläggning, laster och annan påverkan. Som tidigare nämnts är exempelvis nedbrytningen starkt beroende av fyllnadshöjden eftersom kontaktrycken mellan individuella block ökar påtagligt med ökande fyllnadshöjd. Tabell 1 visar en sammanställning av dokumenterade α -värden och påvisar extremt stora variationer i vilka långtidssättningar som kan förväntas. Dock är erfarenheter relativt samstämmiga i slutsatsen att sättningsförloppet är linjärt mot logaritmen av tiden och därför är Sowers ekvation tillämpbar.

Tabell 1. Sammanställning av dokumenterade α -värden.

Plats	Bergmaterial	Utläggning/packning	Typiska värden på α (%)	Variation i α
Olika stenfyllnadsdammar i USA	Granit, kalksten, skiffer	Sorterat material, packat med vält	0,2	N/A
	Konglomerat, skiffer, sandsten	Osorterat material	0,7-1,0	N/A
Olika dagbrott, kolgruvor, Storbritannien	Lersten, siltsten, sandsten	Tung packning, tunna lager	0,1-0,2	+/-40%
		Begränsad packning	0,45	+/-70%
		Ändtippning	>0,65	+/-70%
Hong Kong flygplats	Typ A - väl sorterad hård grantis (<600 mm)	Ändtippat, trafikerat, begränsad packning	0,35 genomsnitt	0,5-1,0 (<1 år) 0,2-0,5 (>1 år)
	Typ D - mix av Typ A med lösmassor / vittrat berg (<300mm)	Ändtippat, trafikerat, begränsad packning	0,5 genomsnitt	0,5-2,0 (<1 år) 0,2-1,0 (>1 år)
Langstranda, Norge	Glimmerskifer (samma material som i Bodø Lufthavn)	Ändtippat, ej packat (trolig påverkan av blöta massor i underkant av fyllning)	1,15-1,30	N/A
Olika dammar, USA	Stenfyllning	Tippat	0,4 genomsnitt	0,15-1,0
	Stenfyllning	Packat	0,03 genomsnitt	0,013-0,07

3 PACKNING

På grund av bergmaterialets benägenhet till nedbrytning blev det tidigt i projektet känt att packningsarbetet behövde begränsas. För sättningsarnas skull var det därför önskvärt att begränsa pallhöjden. Dock skulle framdriften i produktionen bli mycket lidande om materialet var tvunget att krossas före utläggning. Med kravet att den största stenstorleken får vara max 2/3 av pallhöjden blev kompromissen en pallhöjd på 1,0 m. Det gav en största stenstorlek på 0,67 m, vilket går att frambringa med konventionell pallsprängning utan efterföljande krossning och sortering.

För att minska krypsättningarna i sprängstensfyllningen krävdes ett optimerat packningsprogram. Då bergmaterialet var av sämre kvalitet skedde dock en stor mängd krossning i samband med packning. Krossning i en mindre omfattning är att förvänta vid alla packningsarbeten men då krossningen blir så omfattande att stenar inte längre har kontakt med varandra får fyllningen sämre egenskaper och riskerar stor sättning vid urspolning. Vidare kan fyllningen bli känslig för fukt då finmaterialet

binder vatten. Således krävdes att packningen begränsades för att minska krossningen. Dock var det av yttersta vikt att fyllningen packades så bra som möjligt för att undvika omlagring och nedbrytning, vilket skulle ha gett för stora sättningar. Figur 9 visar provgropar i packad tonalit respektive kalkglimmerskiffer efter 6 överfarter med en tung vält och det är tydligt att packningen har gett en för stor mängd krossning för att fyllningen ska ha tillräckligt bra egenskaper. Packningsarbetet behövde därför minskas i omfattning och belastning.



Figur 8 Nedkrossning efter packning (vänster: tonalit, höger: kalkglimmerskiffer).

Fyllningen bestod av en varierande mäktighet under vatten, ca 2 m i tidvattenzonen samt ca 6 m över medelvatten. För fyllningen under vatten utreddes olika packningsmetoder, där fallviktspackning bedömdes som den mest lämpliga. Det bedömdes dock att en stor mängd av energin skulle gå åt till att krossa materialet vilket, i kombination med den begränsade packningsmöjligheten under vatten, skulle ge större sättningar och att nackdelarna skulle överstiga fördelarna. Således beslutades att fyllningen under vatten skulle lämnas opackad. För att kompensera för detta skulle stor vikt läggas vid packningen över vatten och i tidvattenzonen, i kombination med en överlast.

För att bedöma optimalt packningsarbete över vatten, som skulle ge så bra packning som möjligt, och samtidigt begränsa krossningen, utformades ett packningsprogram och ett uppföljningsprogram utifrån två packningsförsök. Det tillämpades även i tidvattenzonen. Fyllningen på större djup lämnades opackad men närmast under den lägre tidvattennivån packades materialet med vält vid lågvatten.

3.1 Packningsförsök för packningspotential och maskinval

För att bedöma packningspotentialen av befintligt berg på projektområdet och hitta ett lämpligt förfarande samt maskinval utfördes ett packningsförsök under projektets

utvecklingsfas. Det huvudsakliga syftet var att studera krossningen i samband med utläggning och packning och ställa det i relation till det packningsarbete som kan erhållas. Ytterligare ett syfte var att studera huruvida berget kunde användas som frostisoleringslager. Försöket utformades för att återspegla förfarandet vid produktion i så stor utsträckning som möjligt.

Packningsförsöket utfördes i en bergtäkt på projektområdet. Två olika bergarter förekommer i täkten och på projektet (kalkglimmerskiffer och tonalit) och packningsförsöket utfördes på båda bergarterna. Båda bergarterna sönderfaller lätt.

Vid försöket användes tre olika vältar av olika storlek och med olika egenskaper för att observera skillnaden i krossning och packningseffekt. Dessa visas i Tabell 2 och i Figur 10. Vältarnas skillnader bestod främst i statisk linjelast och i frekvens. De två Dynapacvältarna var utrustade med automatisk frekvensstyrning som automatiskt justerar frekvensen. Denna låg konstant runt 20 Hz under allt packningsarbete.

Tabell 2 Packningsutrustning

	Dynapac CA6500D Seismic	Dynapac CA4000D Seismic	Hamm H25i
Statisk linjelast	65 kg/cm	41 kg/cm	77,8 kg/cm
Packningsbredd	2,13 m	2,13 m	2,14 m
Totalvikt	20 900 kg	13 100 kg	24 925 kg
Valsmodulvikt	13 950 kg	8 700 kg	16 650 kg
Frekvens (hög/låg amplitud)	29 Hz ¹ / 30 Hz ¹	30 Hz ¹ / 30 Hz ¹	27 Hz / 30 Hz
Nominell amplitud (hög/låg)	2,1 mm / 0,8 mm	2,0 mm / 0,8 mm	2,02 mm / 1,20 mm
Centrifugalkraft vid fast frekvens (hög/låg amplitud)	360 kN / 150 kN	270 kN / 120 kN	331 kN / 242 kN

¹Vid fast frekvens. Med frekvensstyrning påslagen är frekvensen automatiskt variabel.



Figur 9 Vältar för packningsförsök: Dynapac CA4000D Seismic, Dynapac CA6500D Seismic och Hamm H25i.

Packningsförsöket utfördes med bergarterna kalkglimmerskiffer och tonalit. Två olika pallhöjder utvärderades med olika fraktioner där max stenstorlek motsvarar 2/3 av total pallhöjd.

- 1,0 m pallhöjd: Fraktion 0-670 mm, sorterad
- 0,67 m pallhöjd: Fraktion 0-330 mm, krossad med mobilt krossverk.

Försöket utfördes med två pallar där den undre pallan syftade till att vara underlag till Pall 2 som var den huvudsakliga försökspallen. Pall 2 delades sedan in i fem delområden som packades på olika sätt med avseende på vals, antal överfarter och amplitud. Utfört arbete visas i Tabell 3. På pall 2 utfördes två statiska överfarter med H25i före packning. Provbanken visas i Figur 11.

Tabell 3 Utfört packningsarbete

Pall	Vält	Frekvens	Amplitud	Antal överfarter	YPK	Kommentar
1	CA6500D+CA4000D	Variabel	Hög	2+6 (tot. 8)	Ja	Vältbyte pga krossning
2A	H25i	27 Hz	Hög	12	Nej	
2B	CA6500D	Variabel	Hög	12	Ja	
2C	H25i	30 Hz	Låg	12	Nej	
2D	CA4000D	Variabel	Låg	12	Ja	
2E	CA4000D	Variabel	Hög	12	Ja	



Figur 10 Provbänk för packningsförsök.

3.1.1 Utvärdering av packningsresultat

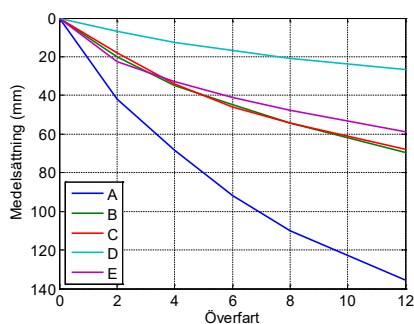
För att bedöma packningen och krossningen utvärderades försöket kontinuerligt med fotografering, yttäckande packningskontroll, nivåmätning/sättningsmätning, provgropar, provtagning med labbförsök med korngradering samt statisk plattbelastning.

3.1.2 Resultat av packningsförsök

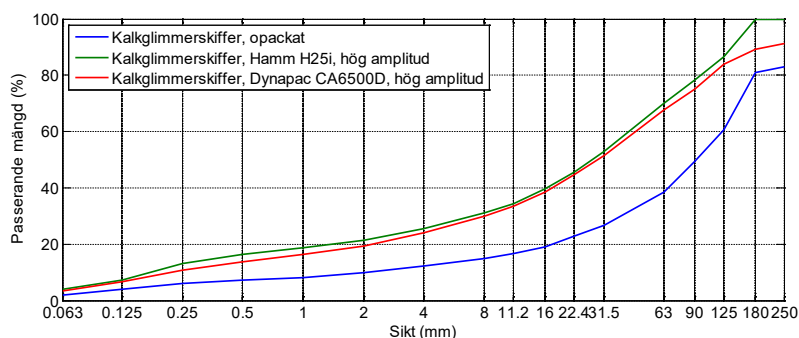
Medelsättningen per område visas mot antalet överfarter i Figur 12. Störst sättning har område A som packades med Hamm H25i hög amplitud, nästan dubbelt så stor sättning som område B (Dynapac CA6500D, hög amplitud). Vidare gav Hamm H25i låg amplitud samma sättning som Dynapac CA6500D hög amplitud. Dock ska sättningen tolkas med försiktighet då sättningen inte bara är ett resultat av packning utan också och krossning/nedbrytning och sidoförflyttning.

Visuell kontroll av ytan skedde efter varje överfart. Redan efter 2 överfarter var krossningen i ytan stor och efter 6 överfarter var i princip hela ytan täckt av finmaterial, förutom 2D (CA4000D, låg amplitud).

Provtagning utfördes med labbförsök för siktkurvor. Provtagning gjordes på Pall 2A-E efter 12 överfarter samt på opackat material. Figur 13 visar siktkurvor på kalkglimmerskiffer, packat med hög amplitud. Krossningen var stor för båda vältarna, något större för Hamm H25i. En viss del av krossningen resulterade i finmaterial (<0,063 mm) men den största delen resulterade i sand- och grusfraktioner.



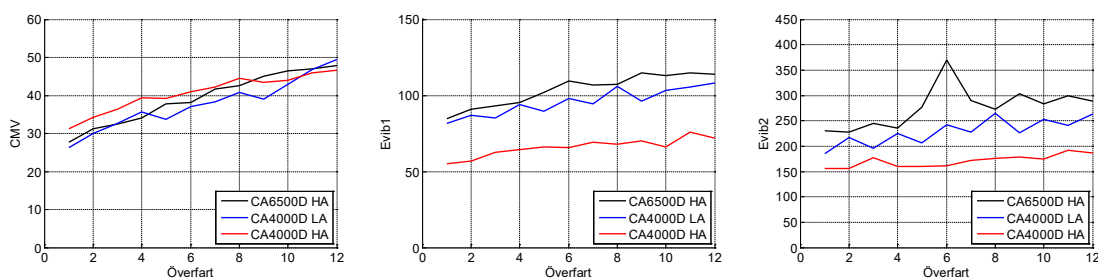
Figur 11 Sättning alla områden Pall 2.



Figur 12 Siktkurvor kalkglimmerskiffer.

Yttäckande packningskontroll, YPK, utfördes på pallar packade med Dynapacvältar. På pallar packade med Hamm utfördes ej YPK då denna vält saknade utrustning. YPK-värden med olika vältar ska ej jämföras med varandra. En svag ökning kan ses i alla värden, dock från och till mycket blygsamma nivåer. Detta antyder att styvheten endast ökar marginellt och att packningen ej är tillfredsställande.

Alla ytor där YPK registrerats visas i Figur 14. Absoluta belopp ska ej jämföras mellan vältar och inställningar, dvs. det är tillväxten som ska observerats. CA4000D med hög amplitud gav en något sämre tillväxt i alla YPK-värden medan CA4000D låg amplitud och CA6500D hög amplitud gav liknande tillväxt. Tillväxten var relativt konstant upp till 8 överfarter och avtog sedan.



Figur 13 YPK för pall 2B, 2D och 2E.

För visuell kontroll av nedkrossning utfördes provgropar efter 6 överfarter på pall 2A och 2B (se Figur 9). Provgroparna visade att krossningen var påtaglig och att krossningen utbreder sig till hela pallens djup. Närmast banköverytan fanns ett skikt på flera centimeter med endast finare material. Krossningen var stor med båda vältarna men Hamm H25i gav betydligt mer krossning än Dynapac CA6500D, vilket är förväntat då H25i har högre statisk linjelast, frekvens och centrifugalkraft.

Efter utförd packning utfördes statisk plattbelastning på samtliga testpallar. Resultat från plattbelastning visas i Tabell 4 till Tabell 8. Plattbelastning har generellt hög variation och resultat från enskilda punkter ska tolkas med försiktighet. Modulen E2 är den parameter som anses bäst reflektera bankens styvhet och ett högt värde betyder högre styvhet. Kvoten E2/E1 reflekterar i viss utsträckning kvarstående packningspotential där ett högt värde antyder att mycket packningspotential kvarstår och ett lågt värde är således eftersträvarvärt. Dock är kvoten osäker då modulen E1 i stor utsträckning beror på lokala förutsättningar i ytan.

Tabell 4 Plattbelastning Pall 2A.

Punkt	Material	Maskin	Amplitud	E1	E2	E2/E1	OK för frostisolering
A1	Kalkglimmerskiffer	H25i	Hög	35	49	1,4	NEJ
A2	Kalkglimmerskiffer	H25i	Hög	27	118	4,4	NEJ
A8	Tonalit	H25i	Hög	40	124	3,1	JA
A9	Tonalit	H25i	Hög	57	163	2,8	JA
A10	Tonalit	H25i	Hög	31	139	4,4	NEJ
Medel				38	119	3,1	NEJ
Standardavvikelse					43	1,3	
75% percentil					90	4	NEJ

Tabell 5 Plattbelastning Pall 2B.

Punkt	Material	Maskin	Amplitud	E1	E2	E2/E1	OK för frostisolering
B2	Kalkglimmerskiffer	CA6500D	Hög	47	148	3,2	JA
B3	Kalkglimmerskiffer	CA6500D	Hög	46	131	2,9	JA
B9	Tonalit	CA6500D	Hög	30	131	4,4	NEJ
B10	Tonalit	CA6500D	Hög	40	113	2,8	NEJ
B11	Tonalit	CA6500D	Hög	29	110	3,7	NEJ
Medel				38	127	3,3	JA
Standardavvikelse					15	0,7	
75% percentil					116	3,7	NEJ

Tabell 6 Plattbelastning Pall 2C.

Punkt	Material	Maskin	Amplitud	E1	E2	E2/E1	OK för frostisolering
C6	Tonalit	H25i	Låg	19	107	5,6	NEJ
C7	Tonalit	H25i	Låg	20	103	5,1	NEJ
C8	Tonalit	H25i	Låg	20	98	4,9	NEJ
C9	Tonalit	H25i	Låg	24	110	4,6	NEJ
C10	Tonalit	H25i	Låg	22	91	4,2	NEJ
Medel				21	102	4,8	NEJ
Standardavvikelse					8	0,5	
75% percentil					97	5,2	NEJ

Tabell 7 Plattbelastning Pall 2D.

Punkt	Material	Maskin	Amplitud	E1	E2	E2/E1	OK för frostisolering
D6	Tonalit	CA4000D	Låg	57	131	2,3	JA
D7	Tonalit	CA4000D	Låg	44	121	2,7	JA
D8	Tonalit	CA4000D	Låg	60	139	2,3	JA
D9	Tonalit	CA4000D	Låg	46	121	2,6	JA
D10	Tonalit	CA4000D	Låg	52	131	2,5	JA
Medel				52	129	2,5	JA
Standardavvikelse					8	0,2	
75% percentil					123	2,6	JA

Tabell 8 Plattbelastning Pall 2E.

Punkt	Material	Maskin	Amplitud	E1	E2	E2/E1	OK för frostisolering
E6	Tonalit	CA4000D	Hög	27	113	4,2	NEJ
E7	Tonalit	CA4000D	Hög	82	139	1,7	JA
E8	Tonalit	CA4000D	Hög	30	105	3,5	NEJ
E9	Tonalit	CA4000D	Hög	36	139	3,8	NEJ
E10	Tonalit	CA4000D	Hög	42	143	3,4	JA
Medel				43	128	2,9	JA
Standardavvikelse					17	1,0	
75% percentil					116	3,6	NEJ

3.1.3 Sammanfattning av mätresultat

Nedan sammanfattas mätningarna med avseende på skillnad mellan olika maskiner och inställningar.

- Okulär krossningsbedömning visade att krossningen var mycket stor för alla maskiner och inställningar. Dock gav CA4000D låg amplitud betydligt mindre krossning än övriga.
- Provtagning visade att krossningen var stor för alla maskiner och inställningar.
- Yttäckande packningskontroll visade att packningen var bristfällig för alla maskiner och inställningar. Efter 8 överfarter var tillväxten sämre.

- Provgropar visade att krossningen var större för H25i än för CA6500D.
- Statisk plattbelastning visade att CA4000D låg amplitud gav bäst packning, följt av CA4000D hög amplitud. CA6500D hög amplitud och H25i hög amplitud gav något sämre resultat medan H25i låg amplitud gav mycket bristfällig packning.

Ovanstående resultat antyder att CA4000D låg amplitud gav bäst packning och minst krossning. Dock ska hänsyn tas till att plattbelastning endast mäter styvheten ner till ca 0,5 m djup och packningen under det kan vara sämre. Låg amplitud har inte ett packningsdjup som motsvarar pallhöjden. Därför ansågs en medelstor vält med en kombination av hög och låg amplitud mest lämplig för både fyllning och frostisolering. Vidare är det visat i tidigare studier att avslutande statistiska överfarer på varje pall är viktigt för att motverka uppluckring i ytan (Wersäll, 2016).

3.2 Packningsförsök för optimal packning

Det första packningsförsöket påvisade den svåra avvägningen mellan packning och krossning. Följande förutsättningar ansattes utifrån resultaten från försöket:

- Pallhöjd 1,0 m
- Sprängsten med fraktion 0-670 mm
- Statisk linjelast ca 40 kN/m
- Kombination av hög amplitud, låg amplitud och statisk
- Låg frekvens

Ytterligare ett packningsförsök utfördes för att bedöma lämplig kombination av överfarer vid olika maskininställningar. Packningen utfördes med en vibrerande vält av typ Cat CS14 med egenskaper enligt Tabell 9. Vibrationsfrekvensen var ca 24 Hz.

Tabell 9 Packningsutrustning i andra packningsförsöket.

	Cat CS14
Statisk linjelast	42,3 kg/cm
Packningsbredd	2,134 m
Totalvikt	14 336 kg
Valsmodulvikt	9 035 kg
Frekvens	23,3 - 30,5 Hz
Max. nominell amplitud (hög/låg)	2,1 mm / 0,98 mm
Max. centrifugalkraft (hög/låg amplitud)	301 kN / 141 kN

Försöksområdet delades in i fyra delområden på ca 300 m² vardera där följande packningsprocedur tillämpades (Figur 15):

- Gult område: 2 överfarer med hög amplitud, följt av 2 överfarer med låg amplitud, följt av 2 statistiska överfarer (2+2+2).
- Grönt område: 4 överfarer med hög amplitud, följt av 2 överfarer med låg amplitud, följt av 2 statistiska överfarer (4+2+2).

- Blått område: 2 överfarer med hög amplitud, följt av 4 överfarer med låg amplitud, följt av 2 statiska överfarer (2+4+2).
- Rött område: 4 överfarer med hög amplitud, följt av 4 överfarer med låg amplitud, följt av 2 statiska överfarer (4+4+2).

3.2.1 Utvärdering av packningsförsök

För att utvärdera packningen användes yttäckande packningskontroll, sättningsmätning, statisk plattbelastning och tung fallvikt.

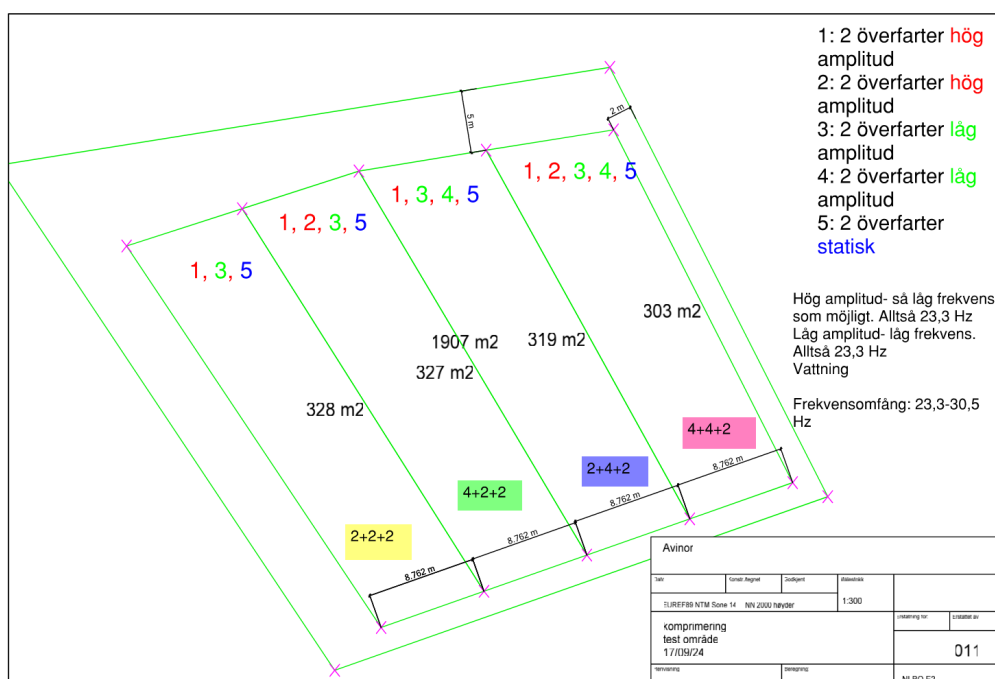
3.2.2 Sammanfattning av mätresultat

De utvärderade mätresultaten visas i Tabell 10 där de mätningar som bedömdes mest relevanta för packningen är markerade i fetstil. Färgerna är skalade relativt för varje rad/mätmetod så att grön betyder det värdet som är mest positivt för packning och röd är det värdet som är minst positivt för packning medan gul är där emellan.

Från resultaten i Tabell 10 är det tydligt att av de testade kombinationerna är 4+4+2 den som ger bäst packningsresultat, dvs. 4 överfarer med hög amplitud, följt av 4 överfarer med låg amplitud, följt av 2 statiska överfarer.

Krossning analyserades inte i detta försök utan fokus låg på att optimera packningen inom de ramar som bestämdes i det första packningsförsöket.

Utifrån de två packningsförsöken beslutades om ett packningsprogram bestående av 4 överfarer med hög amplitud, 4 med låg amplitud och 2 statiska. Detta recept tillämpades på merparten av all packning i projektet.



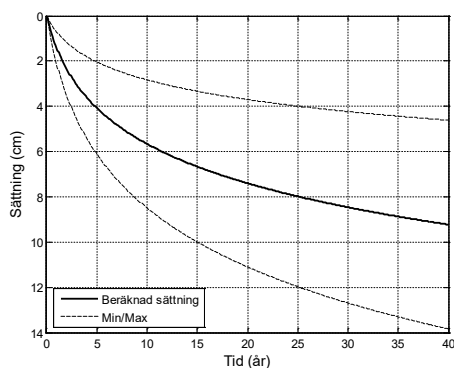
Figur 14 Delområden och packningsprocedur

Tabell 10 Sammanställning av mätresultat.

Typ av komprimering	2+2+2	4+2+2	2+4+2	4+4+2
Medelsättning (mm)	37	54	40	45
Medel Ev2 (Mpa)	158,4	140,2	147,8	168
Median Ev2 (Mpa)	135	135	143	169
Medel Ev2/Ev1	3,46	3,08	2,72	3
CMV sista överfarten framåt	127	127	123	130
CMV sista överfarten bakåt	123	132	128	127
CMV tillväxt sista låg			5,79%	2,01%
MDP sista överfarten framåt	142,6	140,2	140,4	140,4
MDP sista överfarten bakåt	142,9	142,3	143,7	144,3
Fallodd E0-01	206	247	237	237
Fallodd E0-02	153	174	179	181
Fallodd E0-03	147	147	149	154
Fallodd E0-04	203	201	201	211
Fallodd E0-05	214	212	219	231
Fallodd E0-06	209	205	215	222
Fallodd E0-07	198	201	224	218
Fallodd E0-08	210	219	206	240
Fallodd E0-09	203	213	202	234
Fallodd E0-10	212	220	251	245
Fallodd E0-11	201	206	236	200
Fallodd E0-12	166	235	203	179
Fallodd E0-13	196	239	234	208
Fallodd E0-14	225	226	237	219

4 SÄTTNINGSBERÄKNINGAR

För inledande bedömning av sättningarna ansattes $\alpha = 1,0 \%$ för opackad, ändtippad sjöfyllning under vatten, $\alpha = 0,2 \%$ för packad, traktorutbredd fyllning över vatten och $\alpha = 0,1 \%$ för överbyggnad. Med en antagen variation på +/- 50 % erhöles en beräknad sättning enligt Figur 16. Eftersom beräkningen antydde att sättningstoleransen skulle överskridas beslutades om överlast med liggtid.



Figur 15. Beräknad sättning enligt inledande bedömning.

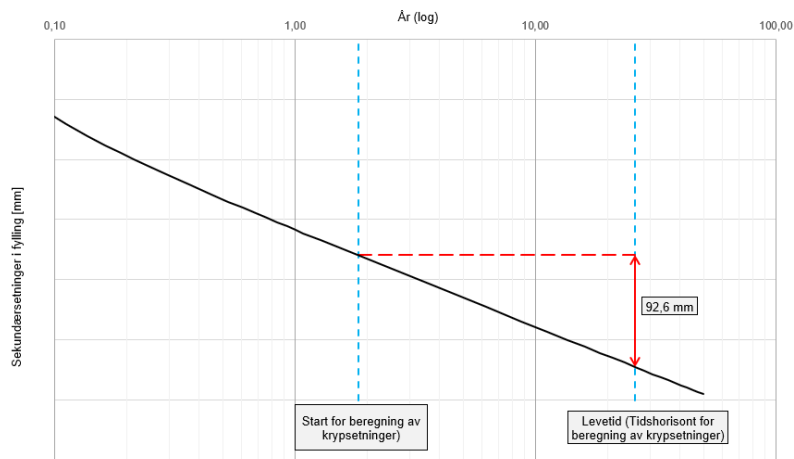
Effekten av överlast på krypsättning i sprängstensfyllning är mycket osäker och det finns inga tillförlitliga modeller för prognostisering. Som tidigare nämnt är dataunderlaget begränsat och påverkan av fyllnadshöjden på sättningsförloppet är

inte linjärt. Willey och Litwinowicz (2002) presenterade dock en förenklad metod, som tillämpades för överlasten i Bodø. Den tar hänsyn till accelererade sättningar vid överlast såväl som de omedelbara sättningar som uppstår då överlasten placeras. Enligt denna modell förhåller sig sättningsparametern α med överlast till den utan överlast enligt följande

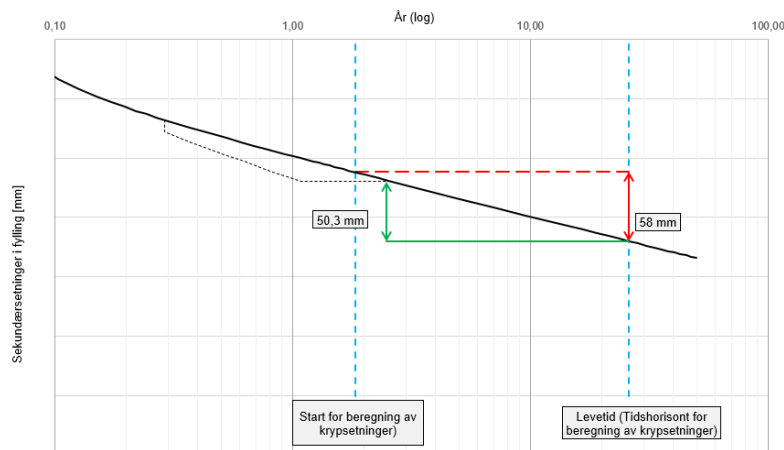
$$\frac{\alpha_{\text{med förbelastning}}}{\alpha_{\text{utan förbelastning}}} = \frac{H+h}{h}$$

där H är ursprunglig fyllnadshöjd och h är överhöjningen.

Överlasten bestämdes utifrån totalt fyllningsdjup och sättningskrav och varierade i olika delar av landningsbanan. Exempel på beräknade sättningar utan och med överlast visas Figur 17 respektive Figur 18. Med överlast beräknades sättningarna uppfylla sättningskravet 80 mm.



Figur 16. Beräknad sättning utan överlast.



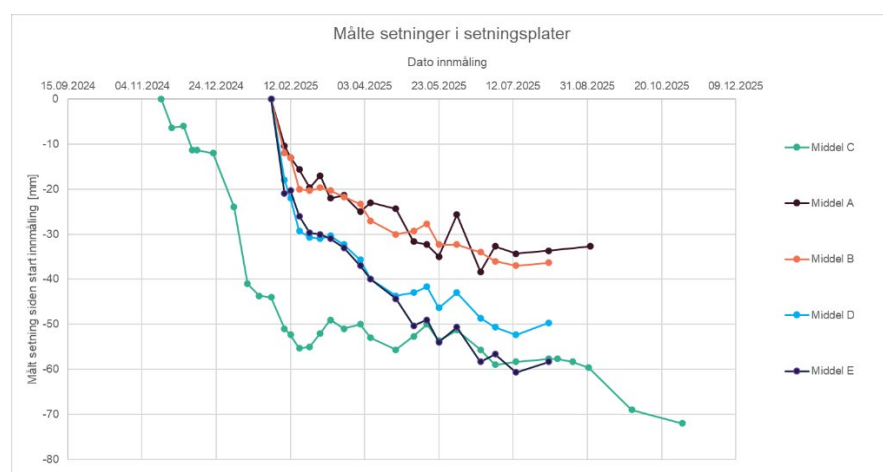
Figur 17. Beräknad sättning med överlast.

5 SÄTTNINGSMÄTNINGAR OCH MODELLUPPDATERING

Mätpeglar utplacerades i fem olika positioner enligt Figur 19. Varje mätposition bestod av tre peglar. Resultaten från sättningsmätningarna visas i Figur 20 i form av medelvärden för respektive mätposition.



Figur 18 Drönarfoto över sjöfyllning och placering av sättningsmätning.



Figur 19. Resultat från sättningsmätningar.

Från uppmätta sättningar fram till sommaren 2025 uppdaterades beräkningsmodellerna med resultaten för att bättre prognostisera framtida krypsättningar. Vidare fanns ett önskemål från projektet att ta av överlasten i förtid av produktionsmässiga skäl. I Tabell 11 visas förutsättningarna för mätningarna tillsammans med resultat från beräkningar och modelluppdatering. Tiden för när krypsättningar påbörjas, t_0 , är antagen till medelvärdet mellan tidpunkten för utlagd sjöfyllning och tidpunkten för utlagd fyllning över vatten. Det utvärderade α -värdet är baserat på mätningarna och presenteras tillsammans med det som beräknades för

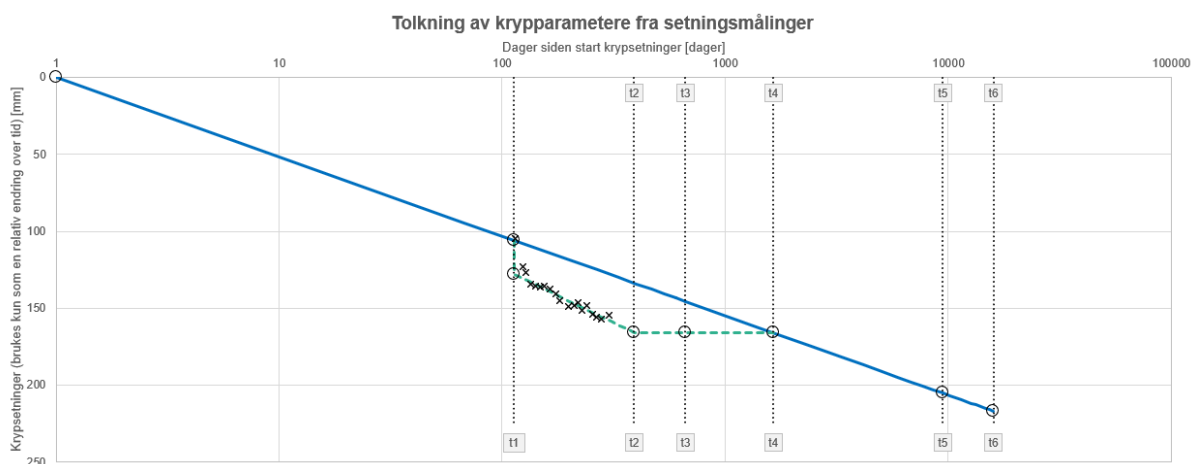
respektive profil i projekteringen. Mätposition C var placerad vid släntfot till överlasten och effekten av överlast har därför ej medräknats för denna. De tre sättningarna som redovisas baseras på mätningarna och avser:

- Beräknad sättning i driftskedet utan effekt av överlast.
- Beräknad sättning i driftskedet med överlast till augusti 2025.
- Beräknad sättning i driftskedet med överlast till november 2025.

Figur 21 visar ett exempel på modeluppdateringen baserad på mätresultaten.

Tabell 11. Förutsättningar och resultat från sättningsberäkningar med modelluppdatering.

	A	B	C	D	E
Sjöbotten	-2,8 m	-3,5 m	-4,0 m	-4,3 m	-5,2 m
t0	2024-10-02	2024-10-13	2024-10-07	2024-10-07	2024-11-23
UK pegel	+4,3 m	+4,3 m	+1,6 m	+4,3 m	+4,3 m
Projekterad mark	+6,1 m	+6,1 m	+5,45 m	+6,16 m	+5,85 m
ÖK överlast	+8,1 m	+8,7 m	+11,0 m	+11,6 m	+9,3 m
Utvärderat α -värde (beräknat i projekteringen)	0,80 % (0,63 %)	0,55 % (0,66 %)	0,50 % (0,91 %)	0,60 % (0,69 %)	0,75 % (0,72 %)
Sättning utan överlast	82 mm	61 mm	55 mm	72 mm	98 mm
Sättning med överlast till nov 2025	80 mm	48 mm	-	48 mm	94 mm
Sättning med överlast till aug 2025	82 mm	56 mm	-	58 mm	98 mm



Figur 20. Uppdaterad sättningsberäkning, mätposition D.

Resultaten i Tabell 11 visar att:

- Uppmätta α -värden är relativt nära de beräknade i projekteringen, förutom för mätposition C (där effekten av intilliggande överlast är osäker).
- Överlasten var effektiv i positioner B och D men ej i positioner A och E.
- Att ta av överlasten i förtid ökar sättningarna i driftskedet, som förväntat.
- Sättningskraven uppfylls i alla positioner förutom E där djupet till sjöbotten är som störst och där alltså störst mäktighet opackad fyllning är utlagd. Denna

punkt ligger dock i avåkningszonen, dvs. utanför själva landningsbanan, och större sättningar kunde därför accepteras.

6 SLUTSATSER

Tack vare ett omfattande utredningsprogram, inklusive två packningsförsök, kunde krypsättningar i sprängstensfyllning med dålig bergkvalitet hanteras inom rimliga gränser. Samtidigt som framdrift i produktionen kunde säkras.

Projektet visar att krypsättningar i sprängstensfyllning kan uppskattas och hanteras genom ett rationellt och strukturerat arbetssätt. Dock är prognostisering av krypsättning osäker och ansättandet av parametrar måste göras på ett ingenjörsmässigt sätt, samtidigt som mätningar och verifiering är av yttersta vikt.

REFERENSER

Sowers, G.F., Williams, R.C. & Wallaze, T.S., 1965. Compressibility of broken rock and the settlement of rockfills, In Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, pp. 561-565.

Statens Vegvesen, 2014. Håndbok V221 – Grunnforsterkning fylling og skråninger.

Statens Vegvesen, 2025. N-V220:2025 – Geoteknikk i vegbygging.

Wersäll, C., 2016. Frequency optimization of vibratory rollers and plates for compaction of granular soil, Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology.

Willey, J.C. & Litwinowicz, A, 2002. Management of Creep Settlement in Dumped Rockfill by Surcharging, in The 5th Australia New Zealand Young Geotechnical Professionals Conference, Rotorua, New Zealand.