

# DIMENSIONSERINGSUNDERLAG FÖR MARKKONSTRUKTION MED SLAGGRUS

RAPPORT 2023-971



# **Dimensioneringsunderlag för markkonstruktion med slaggrus**

Fredrik Hellman, VTI, Henrik Bristav, RISE. Shafiqur Rahaman VTI  
Erik Simonsen Heidelberg Materials

Projektledare: Björn Schouenborg, RISE

Finansiär: Avfall Sverige, Energiforsk

ISBN 978-91-7673-971-6 | © Energiforsk december 2023

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se



## Förord

Alternativa konstruktionsmaterial är en viktig väg framåt för att minska klimatpåverkan från stora infrastrukturprojekt. Det har hittills saknats materialspecifika parametrar för dimensionering av konstruktioner med sådana material. Det leder ofta till hinder i upphandling av den här typen av material.

Projektets övergripande syfte har varit att få till en väl fungerande återvinning och cirkulär hantering av sekundära ballastråvaror. Målet har varit att skapa förtroende för materialen i syfte att möjliggöra en ökad användning och förenkla användningen av slaggrus.

Det dimensioneringsprogram som används är ERAPave som är framtaget på VTI för Trafikverkets räkning och kommer ersätta nuvarande dimensioneringssystem. Genom att slaggrus kommer finnas med i materialdatabasen kommer det förenkla användningen och dimensionering framöver. För att ta fram styvhetsdata och nödvändiga materialparametrar för slaggruset har laboratorieförsök och Triaxialförsök gjorts på två material

Björn Schouenborg på RISE har fungerat som projektledare. Projektgruppen har bestått av Fredrik Hellman, VTI, Henrik Bristav, RISE, Shafiqur Rahaman VTI och Erik Simonsen Heidelberg Materials. Projektet har samfinansierats av Avfall Sverige och Energiforsk.

## Sammanfattning

Infrastrukturprojekt använder stora mängder resurser i samhället. För att minska klimatpåverkan är alternativa konstruktionsmaterial en väg framåt. Dock saknas ofta viktiga materialspecifika parametrar för dimensionering av konstruktioner med sådana material. Detta blir ofta ett hinder i upphandling och utformning för att möta behoven (tex trafikklass, hållbarhet och framtida underhållsbehov). Detta projekt är inriktat på att möta dessa problem.

Det övergripande syftet är att få till en väl fungerande återvinning och cirkulär hantering av sekundära ballastråvaror och skapa förtroende för materialen i syfte att möjliggöra en ökad användning. Projektet vill också förenkla användning av slaggrus.

Till skillnad från de projekt som genomfördes under 1990-talet och början av 2000-talet ingår här en systemanalys och genomlysning av affärsmodeller. Ett problem som identifierades var att materialmängden ofta är för liten för stora vägprojekt. Projektet har därför inriktat sig på användning i urban miljö där mindre volymer krävs och transportsträckorna är kortare.

Syftet med detta delprojekt är att undersöka möjligheten att ta fram underlag och materialparametrar för dimensionering av konstruktioner med slaggrus (och andra restmaterial). Det dimensioneringsprogram som används är ERAPave som är framtaget på VTI för Trafikverkets räkning och kommer ersätta nuvarande dimensioneringssystem. Genom att slaggrus kommer finnas med i materialdatabasen kommer det förenkla användningen och dimensionering framöver. För att ta fram styvhetsdata och nödvändiga materialparametrar för slaggruset har laboratorieförsök och Triaxialförsök gjorts på två material. För att verifiera materialparametrar och dimensioneringsmodellen har fullskaleförsök med Heavy Vehicle Simulator (HVS) utförts. Försöken innebär en accelererad provning av konstruktioner där slagg används. HVS utrustningen simulerar realistisk trafikbelastning genom att ett hjul belastar konstruktionen upprepade gånger vilket efterliknar riktig lastbilstrafik. Konstruktionen utsätts för stor trafikbelastning på kort tid. Påverkan på konstruktionen kan följas med sensorer och effekter som exempelvis spårbildning och påkänningar studeras. Att underlaget finns tillgängligt kommer att underlätta för konstruktörer, för offentlig upphandling och därför också öka acceptansen för materialet från deras sida.

Slutsatserna från dessa laboratorie och fullskaleförsök visar att de uppmätta tekniska egenskaperna av de två slaggrusen från SYSAV i Malmö och Umeå energi inte uppfyller vissa av de krav som Trafikverket ställer på obundna bergmaterial för användning i vägkonstruktioner exempelvis styvhet, packningsegenskaper och kornkurva. Slaggrus ingår inte heller som ett av alternativt ballastmaterial i Trafikverkets kravdokumentation. Detta gör att upphandling och användning av slaggrus försvåras för detta användningsområde. Användning i andra för andra ändamål är troligtvis enklare mer resurseffektiva. .

De applikationer där slaggrus kan vara ett alternativ är ytor av olika slag som, parkeringsplatser, gång och cykelvägar, ytor och vägar för industri och hamnar m fl. Teoretiskt binder slaggmaterialet ihop över tid genom att mineralen reagerar med vatten via kemiska

reaktioner och blir styvare över tid. Detta är en egenskap som är en av styrkorna med materialet, men behöver studeras bättre då den kan ha en avgörande inverkan på hållbarhet och livslängd.

Projektledare: Björn Schouenborg, RISE

Författare till denna rapport: Fredrik Hellman, VTI; Henrik Bristav, RISE. Erik Simonsen Heidelberg Materials

Finansiär: Avfall Sverige, Energiforsk (Askprogrammet)

Nyckelord:

## Summary

Infrastructure projects use large amounts of resources in society. To reduce the climate impact, alternative construction materials are a way forward. However, important material-specific parameters for dimensioning constructions with such materials are often missing. This often becomes an obstacle in procurement and design to meet the needs (eg traffic class, sustainability and future maintenance needs). This project is aimed at addressing these issues.

The overall aim is to bring about a well-functioning recycling and circular handling of secondary aggregate raw materials and create confidence in the materials in order to enable increased use.

Unlike the projects that were carried out in the 1990s and early 2000s, this includes a system analysis and clarification of business models. A problem that was identified was that the amount of material was often too small for large road projects. The project has therefore focused on use in urban environments where smaller volumes are required and transport distances are shorter.

The purpose of this sub-project is to investigate the possibility of producing a basis for the dimensioning of constructions with crushed stone (and other residual materials). The dimensioning software used is ERAPave, which was developed at VTI on behalf of the Swedish Transport Administration. In order to obtain stiffness data and material parameters for the crushed stone, laboratory tests and triaxial tests have been carried out. To verify material parameters and the dimensioning model, full-scale tests with the Heavy Vehicle Simulator (HVS) have been performed. The trials involve accelerated testing of constructions where slag is used. The HVS equipment simulates realistic traffic loads by repeatedly loading a wheel on the structure, which simulates real truck traffic. The construction is exposed to heavy traffic in a short time. The impact on the construction can be monitored with sensors and effects such as rut formation and stresses are studied. That the documentation is available will make it easier for designers, for public procurement and therefore also increase acceptance of the material on their part.

The conclusions from these laboratories and full-scale tests show that the measured technical properties of the two bottom ashes from Sysav in Malmö and Umeå energi do not meet some of the requirements set by the Swedish Transport Administration for unbound rock materials for road constructions, such as stiffness, compaction properties and grain curve. This does not mean that these materials cannot be used as building materials, but you need to be aware of the differences. It is therefore not possible to think that these materials can directly replace sub-base layer of rock material.

The applications where bottom ashes can be an alternative are surfaces of various kinds such as , parking areas, bike roads, and surfaces and roads for industrial purposes. Theoretically, the bottom ash materials bind together over time because the mineral reacts with water via chemical reactions and becomes stiffer over time. Stiffness growth is one of the strengths of

the material and needs to be studied better as it can have a definite impact on durability and longevity.



## Innehållsförteckning

Bakgrund	9
Syfte/målsättning	10
Material och labbanalyser	11
Material	11
Triaxial-försök på slaggrus	13
Genomförandet av fullskaleförsök med HVS	14
Konstruktion och uppbyggnad	14
Resultat från HVS körning	17
ERAPave modellen	19
Verifiering av ERAPave modellen	20
Diskussion	22
Teknisk funktion och användningsområden för slaggrus	22
Miljövinster	23
Slutsatser	23
Referenser	25

## Bakgrund

Infrastrukturprojekt använder stora mängder resurser i samhället. För att minska klimatpåverkan är alternativa konstruktionsmaterial en väg framåt. Dock saknas ofta viktiga materialspecifika parametrar för dimensionering av konstruktioner med sådana material.

Slaggrus är en sorterad fraktion av bottenaska från avfallsförbränning. Slaggruset är ett lokalt producerat material som har visat sig fungera väl som ballast i konstruktioner som exempelvis vägar, cykelbanor och parkeringsplatser. Det finns goda exempel på sådana ytor i exempelvis Svågertorp, Trelleborgs hamn, Malmö och Umeå. Trots de goda exemplen har materialet främst använts som konstruktionsmaterial på deponier då materielbehovet för sluttäckning av deponier varit stort. Detta behov minskar stadigt vilket aktualiserat behovet att finna andra hållbara användningar av materialet.

Samtidigt som slaggruset riskerar att behöva läggas på deponi byggs det i städerna olika typer av infrastruktur som aldrig förr. Detta gör att efterfrågan på konstruktionsmaterial är stor, men i huvudsak används jungfruligt material från bergtäkter istället för sekundära råmaterial som exempelvis slaggrus.

Det finns många olika aspekter som spelar in i valen av material till väg och anläggningskonstruktioner. Exempel på saker som inverkar är att anläggningsbranschen generellt är konservativ vid materialval och att vi har gott om billigt bra bergmaterial i Sverige. En annan sak som inverkar är otydligheter i regelverk och vägledningar som inte ger en tydlig bild när man kan använda materialen och hur man ska dimensionera. Det är också ett allmänt dåligt förtroende för många alternativa material och man tror att de utgör en risk både miljö- och konstruktionsmässigt. Dessutom är tillståndsprocessen osäker och tar lång tid.

Listan kan snarast liknas vid ett pussel där det är många delar som måste falla på plats för att verkligen få en ökad användning av alternativa material. Samtidigt börjar incitamenten komma, kommunerna sätter upp mål kring klimatneutralitet och cirkulära materialflöden. Dessutom börjar allt fler branscher sätta upp färdplaner mot klimatneutrala verksamheter, myndigheter som Trafikverket får krav på sig att minska klimatpåverkan från sina verksamheter. Att ersätta jungfruliga material kan då vara en del av lösningen mot resurseffektiva kretslopp. En nyligen genomförd LCA-jämförelse (Fråne och Johansson 2021) av slaggrus och krossat berg som konstruktionsmaterial visar på lägre klimatavtryck (-7kg CO<sub>2</sub>/ton) vid användning av slaggrus. Även andra opublicerade LCA studier som gjorts tex inom Vinovaprojekt *Sekundära ballastråvaror för hållbar anläggningsinfrastruktur* (Vinnovas dnr: 2020-01838) visar liknande resultat. Detta kan ge kommuner stöd i deras klimatarbete att använda denna typ av material. På så sätt kan det också finnas rimliga affärsmodeller att tillämpa där det finns en viktig och klimatmässig funktion som kan fyllas av ett sekundärt material och inte bara bli en fråga om att bli av med ett avfall som man annars får betala deponiskatt på.

Efterfrågan på materialet för täckning av deponier har under en längre tid varit tillräcklig för att få avsättning av materialet. Detta är dock inte längre fallet överallt då efterfrågan för denna tillämpning har minskat de senaste åren. Om inte materialet ska deponeras behöver fler tillämpningar tas fram där materialet fyller en funktion och nytta för de olika aktörerna i värdekedjan. Storskalig användning i större vägprojekt är inte ett rimligt användningsområde på grund av begränsad materialtillgång. Däremot kan materialet användas i mindre anläggningsprojekt och generera mervärden i form av ökade cirkulära materialflöden och minskat klimatavtryck.

En byggherre, konstruktör och entreprenör vill ha en trygghet i att en väg eller en hårdgjord yta, kommer klara den trafiklast som ytan ska utsättas för under dess livslängd. För att dimensionera en stabil konstruktion behövs underlag till dimensioneringstabeller. Idag finns inte sådana vetenskapligt baserade underlag framme och de konstruktörer som finns på

marknaden kan därför inte på ett korrekt sätt beräkna lämpliga lagertjocklekar i en konstruktion som använder alternativa material. I stället blir det baserat på tidigare erfarenheter från vägar och konstruktioner som blir vägledande. Detta har bland annat Sysav, som är en stor producent av slaggrus i Malmöregionen, noterat vid försök att få slaggrus använt i anläggningsbyggande. Erfarenhetsbaserad dimensionering utan förankring i vetenskapliga metoder medför att konstruktionen kanske i längden inte fyller den tekniska funktion som är tänkt. Det kan också medföra en risk för en över- eller underskattning av miljöriskerna med användningen av det sekundära materialet. Dessa beräknas nämligen utifrån konstruktionens utförande och mängden sekundärt material som ingår i konstruktionen är en avgörande parameter.

I detta projekt har två anläggningars slaggrus testats vid Statens Väg- och Trafikforskningsinstitutets (VTI) anläggning i Linköping. Där kan under en begränsad tid och under kontrollerade förhållanden en lång tids användning av konstruktionen snabbas på och flera års användning kan kortas ner till veckor. Resultaten ger viktig information om materialspecifika egenskaper och hur dessa bidrar till konstruktionens mekaniska hållbarhet. De resulterande underlagen kan användas för dimensionering av konstruktioner med slaggrus. Dimensioneringsunderlagen ger en trygghet för de som designar konstruktionerna för användningen av sekundära material (även krossad betong och asfalt) och ger data/verktyg för att använda dem i konstruktionerna på ett transparent sätt. Frånvaron av underlag har tidigare utgjort en barriär för användning.

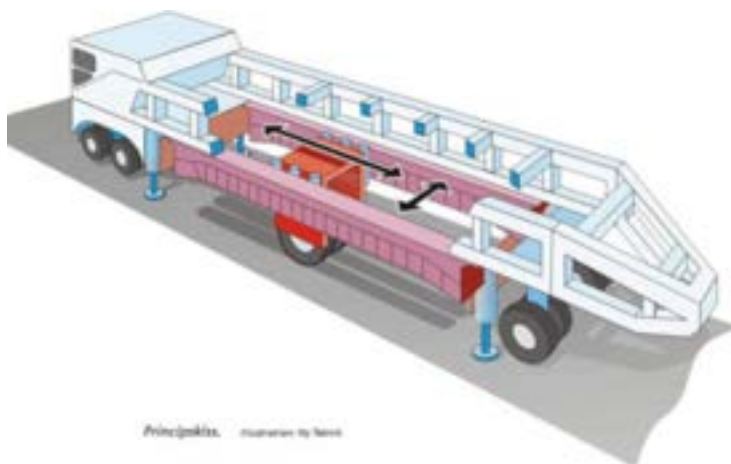
## Syfte/målsättning

Det övergripande syftet är att få till en väl fungerande återvinning och cirkulär hantering av alternativa ballastråvaror och skapa förtroende för materialen i syfte att möjliggöra en ökad användning. Projektet har inriktat sig på användning i urban miljö där mindre volymer krävs och transportsträckorna blir korta.

Ett problem med användningen av alternativa råvaror i olika applikationer är att det ofta saknas materialspecifika data om hur en markkonstruktion bör utformas för att uppfylla krav på relevant trafikklass. Denna studie är inriktad på att möta det problemet.

Syftet med denna studie som ingår i Vinnova projektet *Sekundära ballastråvaror för hållbar anläggningsinfrastruktur* (Vinnovas dnr: 2020-01838) är att ta fram underlag för dimensionering av konstruktioner med slaggrus. Det handlar om att ta fram materialparametrar till dimensioneringsprogrammet ERAPave. Modellen och slaggrusets funktion har sedan validerats genom fullskaleförsök med Heavy Vehicle Simulator (HVS; Figur 1 och 2). Försöken innebär att en långvarig användning av konstruktioner innehållande slaggrus accelereras och kan göras på kort tid under kontrollerade förhållanden. Påverkan av stor trafikbelastning (>1000000 standardaxlar) kan följas med sensorer och nedbrytningseffekter som exempelvis spårbildning och deformationer kan studeras.

På sikt kan dimensioneringstabeller tas fram men för att göra det behövs mer empirisk erfarenhet från byggda konstruktioner. Dessutom behöver variationen i slaggrusmaterial från olika anläggningar verifieras. För att ta fram tabellvärden krävs att gränsvärden och acceptabel spårdjupsutveckling och andra hållbarhetsaspekter tas fram. I dagsläget finns inte dessa kriterier framtagna. Att ta fram detta underlag är ett första steg och underlättar detta arbete. I förlängningen behövs bygganvisningar och krav på materialet tas fram och beskrivas i regelverk som AMA anläggning som ofta används för offentlig upphandling. Det ökar acceptansen för materialet från beställare och väghållare.



Figur 1. Heavy Vehicle Simulator (HVS)



Figur 2. Provningshall med pågående provning av permeabla konstruktioner

## Material och labbanalyser

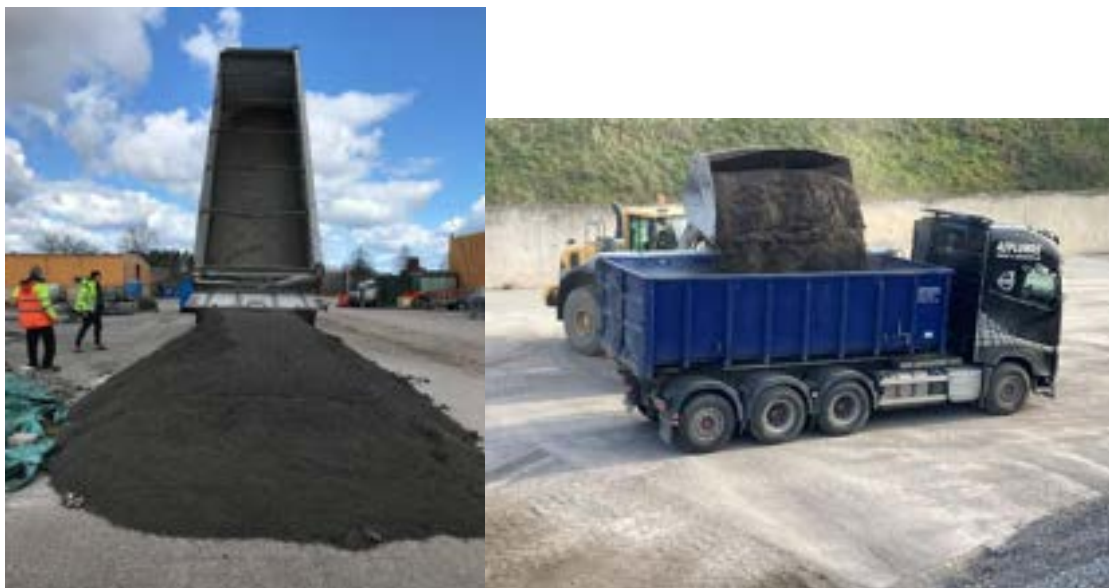
Nedan beskrivs använda slaggrusmaterial, labbanalyser och triaxialförsök.

### Material

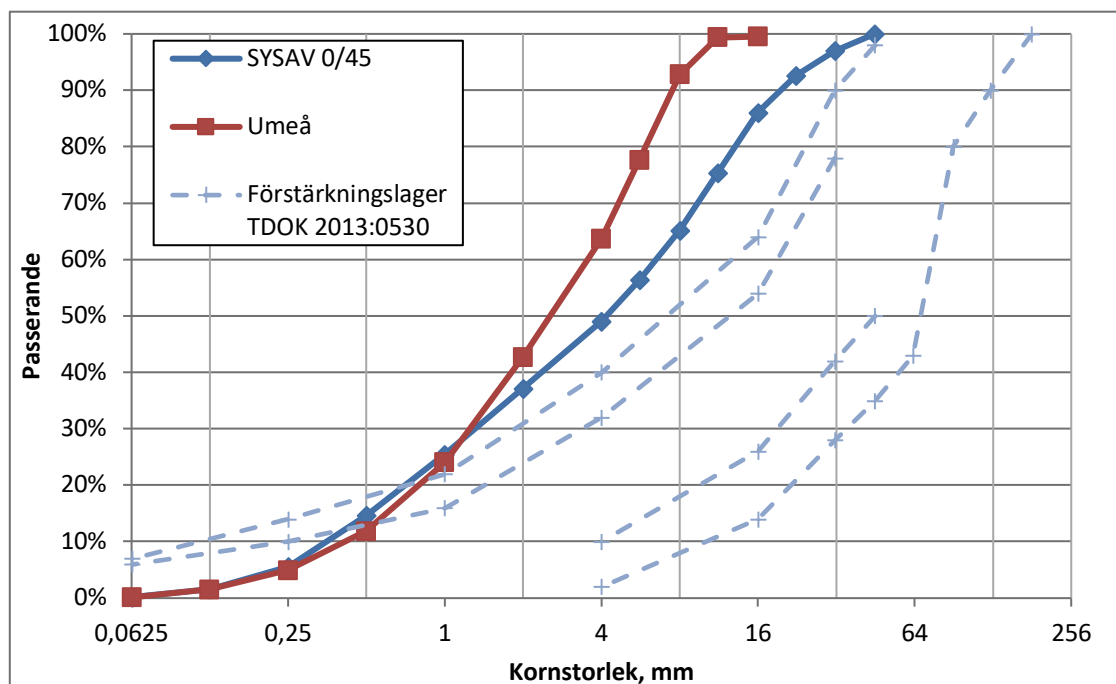
Materialet utgjordes av sorterat slaggrus, från avfallsförbränning, som genomgått metallavskiljning och överstora partiklar (Figur 3). Leverantörer av slaggrus var Umeå Energi AB och Sydskaens avfallsaktiebolag (Sysav) med sorterat slaggrus från rosterpanna vid Dåva kraftvärmeverk i Umeå, respektive Sysavs avfallsförbränning vid Spillepeng, Malmö. Bränslet utgjordes av hushållsavfall och verksamhetsavfall och samtliga pannor är rosterpannor. Efter förbränning har slaggruset lagrats och genomgått sortering och metallseparering. I Sysavs fall har detta skett i egen stationär sorteringsanläggning medan i Umeå har sortering skett med mobil utrustning. Båda sorteringsmetoderna anses vara likvärdiga.

Partikelstorleken låg för Umeå Energis slaggrus på 0-15 mm (0/15) och för slaggruset från Sysav på 0-45 mm (0/45). Storleksgraderingen för de två materialen visas nedan med Trafikverkets kravnivåer för bär- och förstärkningslager inlagda (Figur 4). Det man kan se är att korngraderingsmässigt faller dessa material utanför gränsvärdena för traditionella bergmaterial. De innehåller mycket korn i mellanfraktionen 0,5-8 mm vilket skiljer dessa material från traditionella bergmaterial där framförallt andelen grövre partiklar är större. Naturlig fukthalt är kontrollerad snarast efter ankomst och är den fukthalt som används vid byggnation. Optimal fukthalt (Tabell 1) är framtagen med standard Proktor(SS-EN 13286-2)

föra att inte krossa sönder provet användes standard Proktor och inte modifierad. Optimal fuktkvot är den fuktkvot där materialet kan kompakteras mest och får högst kompakt densitet.



Figur 3. Till vänster: slaggrus från Umeå Energi anländer till VTI. Till höger: slaggrus från Sysav lastas för transport till VTI.



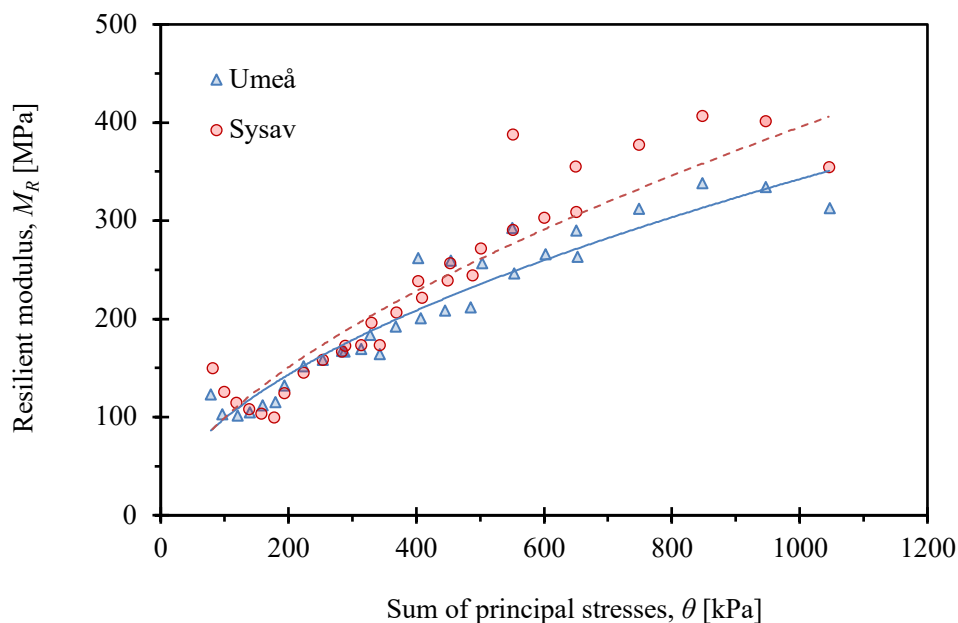
Figur 4. Korngradering för de två slaggrusmaterialen och Trafikverkets kravnivåer för kornstorleksfördelningen (streckade linjer) för förstärkningslager till flexibla konstruktioner. Linjerna anger normalt undre/övre värde samt högsta/lägsta värde. Kornstorleksfördelningen ska normalt ligga mellan normalt undre och övre värde och får vara i en av de yttre zonerna (högsta/lägsta värde).

Tabell 1. Materialegenskaperna testades med avseende på fukthalt och torrdensitet. Optimal fukthalt är kontrollerad med standardmetod SS-EN 13286-2 för Proctor.

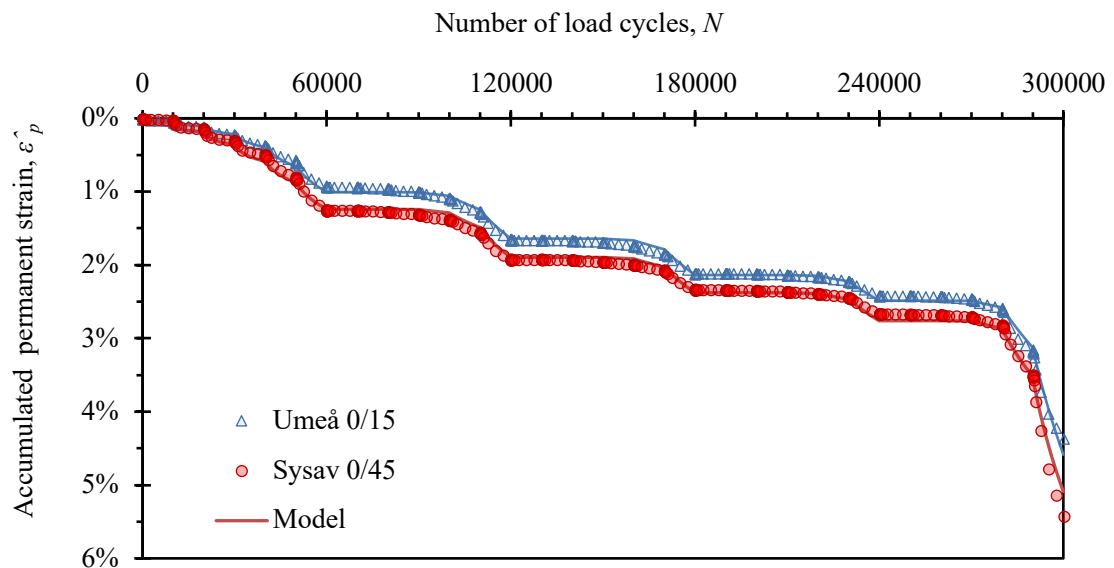
	Sysav 0/45	Umeå 0/15
Naturligt fukttinnehåll (%)	10,8	12,3
Optimalt fukttinnehåll (%)	12,5	19
Max torrdensitet (ton/m <sup>3</sup> )	1,77	1,59

### Triaxial-försök på slaggrus

Det har genomförts triaxial-försök (Figur 5 och 6) för att ta fram styvhetsdata och materialparametrar. Dessa data är nödvändiga för att göra mekanistisk dimensionering och för att kunna modellera den teoretiska spårdjupsutvecklingen med ERAPave programmet (Figur 14). Triaxial försök görs på cylindriska provkroppar där materialet packats under bestämd fuktkvot och placerats i ett gummimembran. Provkroppen belastas sedan enligt ett schema där belastningen och stressen gradvis ökar. Materialets styvhetsgenskaper (Figur 5) och dess deformation (Figur 6) kan mätas under försökets gång. Dessa analyser redovisas bara översiktligt i denna rapport.



Figur 5. Styvhetsdata uppmätt i triaxialförsök från de två slaggrusen (Umeå och Sysav).



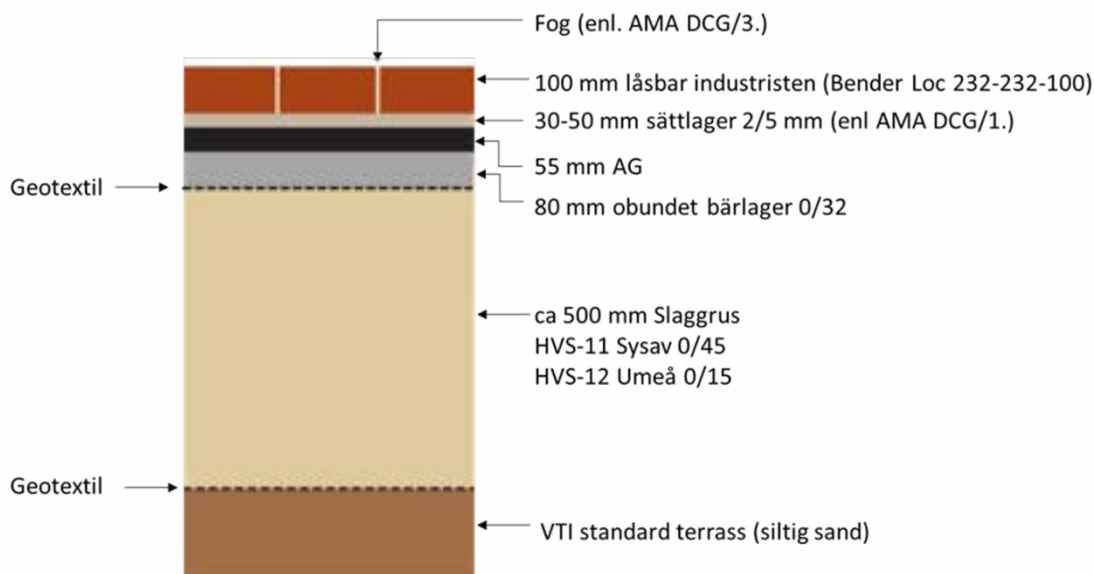
Figur 6. Permanent deformationi de två materialen från Umeå och Sysav under ökad stress uppmätt under triaxialförsök.

## Genomförandet av fullskaleförsök med HVS

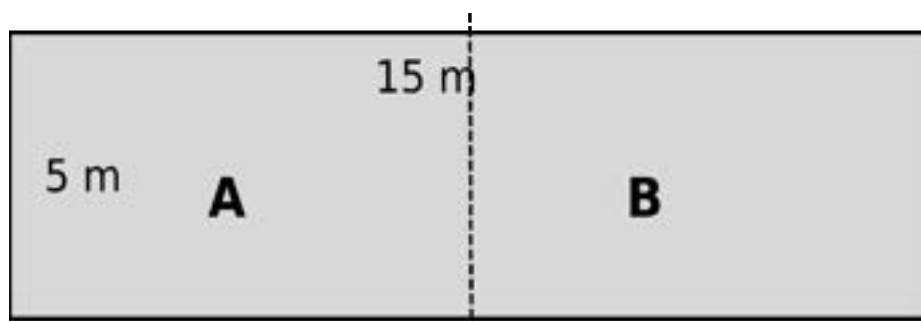
HVS försök genomförs genom att ett hjul belastar ytan med ett bestämt tryck och simulerar att ett lastbilshjul passerar. Försöken simulerar riktig trafik och kan på kort tid belasta ytan med många års trafik och man kan mäta uppkomna spårdjup och skador. Nedan beskrivs konstruktionens uppbyggnad genomförande och resultat. Resultaten används för att verifiera dimensioneringsmodellen.

### Konstruktion och uppbyggnad

Konstruktionerna (Figur 7) bygger på tidigare Vinnovaprojekt med avseende på lagertjocklekar vilket gör att resultaten är jämförbara och direkt relaterar till materialskillnader i konstruktionerna som testats. Slaggruset har lagertjocklek som är vanligt förekommande vid användning. Byggandet av konstruktionen utförs av NCC i testhallen som består av en 15 m lång, 5 m bred och 3 m djup betongbassäng (Figur 8). I samband med byggandet placerades sensorer och lägesgivare in i materialet för att kunna kontrollera sättningar, deformationer och belastningar. Dessa data används som en viktig del i att verifiera dimensioneringsmodellen. Försöksytan delades in i två delar. Ytan som belastas av hjulet är 6 m lång. I del A användes slaggrus från Sysav och på del B slaggrus från Umeå Energi.



Figur 7. Tvärsektion av försöksytan



Figur 8. Försöksytan uppifrån, A: Sysav B: Dåva

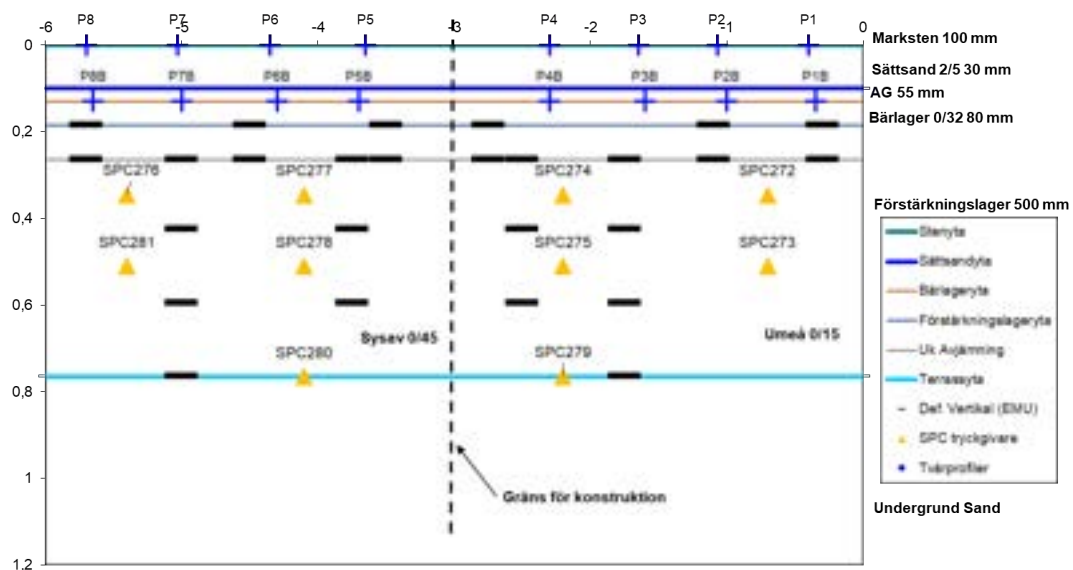
Försöksytan instrumenterades sensorer som mäter deformation i materialet (EMU<sup>1</sup>) och med trycksensorer (SPC<sup>2</sup>). Dessa sensorer placerades i konstruktionen på olika djup (figur 9) i mitten på konstruktionen som belastas av hjulet.

Under byggnationen har terrass, färdig yta med förstärkningslager och bärlager kontrollerats med plattbelastning enligt Trafikverkets krav på bärlighet (TDOK 2014:0141 och TDOK 2013:0530). Plattbelastning är en enkel standardmetod för kontroll av styvhet av en konstruktion. Resultaten kan ses i figur 10. Terrassen har värden som är normala för detta material och visar att ytan har de egenskaper som den ska ha under försöken. Plattbelastning av slagmaterialen efter färdigställande av förstärkningslager visar på låga styvhetsvärden (68 MPa Dåva och 80 MPa Sysav). Eftersom materialet är sprött och går sönder om för mycket packningsenergi tillförs valdes ett standardförfarande med ca 8 överfarter med en 450 kg padda. Ett standard 0/32 bärlager av bergmaterial packades enligt standardförfarande med 8 överfarter och ett högre styvhetsvärde kunde uppnås på 100 MPa (Dåva) och 101 MPa (Sysav). Jämfört med kravnivåer från Trafikverket (TDOK 2013:0530) som är 140 MPa (medelvärde för styvhetsmodulen  $Ev2 > 140 + 0,96 \times \text{standardavvikelsen för 8 punkter}$ ) är dessa värden låga. Två fältmätningar från ytor på Dåva visar på väldigt olika styvheter (166 och 88 MPa) och är svåra att dra några slutsatser ifrån.

Provningsen med HVS startade under hösten och vintern 2021/2022 .



Instrumentering HVS sektion SE27

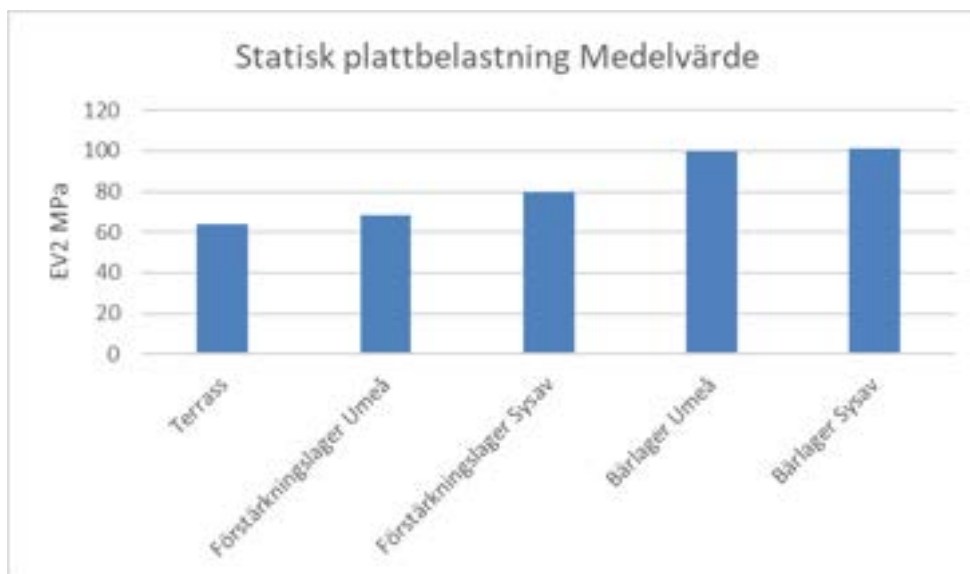


Figur 9. Instrumentering av HVS tvärsektion.

## Fotnot:

<sup>1</sup>. EMU För att kunna mäta deformationer i materialen installeras induktiva lägesgivare (EMU sensorer). De fungerar i par med en sändare och mottagare. Sändaren inducerar ett magnetfält som kan mätas av mottagaren och genom att de parvis är kalibrerade kan avståndet mellan de två givarna mätas genom att avläsa det uppkomna strömmen i mottagaren. Genom att ha EMU givare på olika nivåer i konstruktionen kan de uppkomna deformationerna beräknas. Sensorerna kalibreras och tillverkas av VTI

<sup>2</sup>. SPC Den dynamiskt uppkomna vertikala stressen eller trycket i materialet som uppstår när hjulet passerar kan mätas med SPC sensorer (Soil Pressure Cells). Sensorn består av en 220 mm stora stålplatta med en hydraulisk vätska emellan. En trycksensor mäter det uppkomna stressen i materialet som omger sensorn. SPC:s tillverkas av Geocon och är av typen 3500-2-1MPa. Mätningen kan användas till att beräkna jordtrycket på olika nivåer i konstruktionen vid en överfart av hjulet.

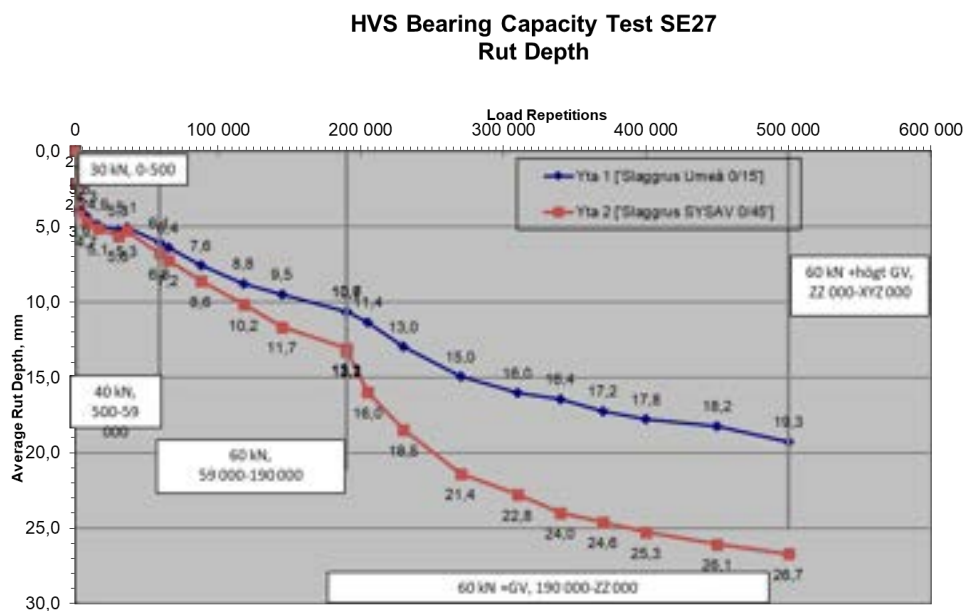


Figur 10 Resultat (medelvärde EV2 elasticitetsmodul efter pålastning 2) från plattbelastningsmätning på olika nivåer i konstruktionen terrass, förstärkningslager av slaggrus (Umeå och Sysav) och bärlager 0/32 av bergmaterial (samma bergmaterial för båda konstruktionerna).

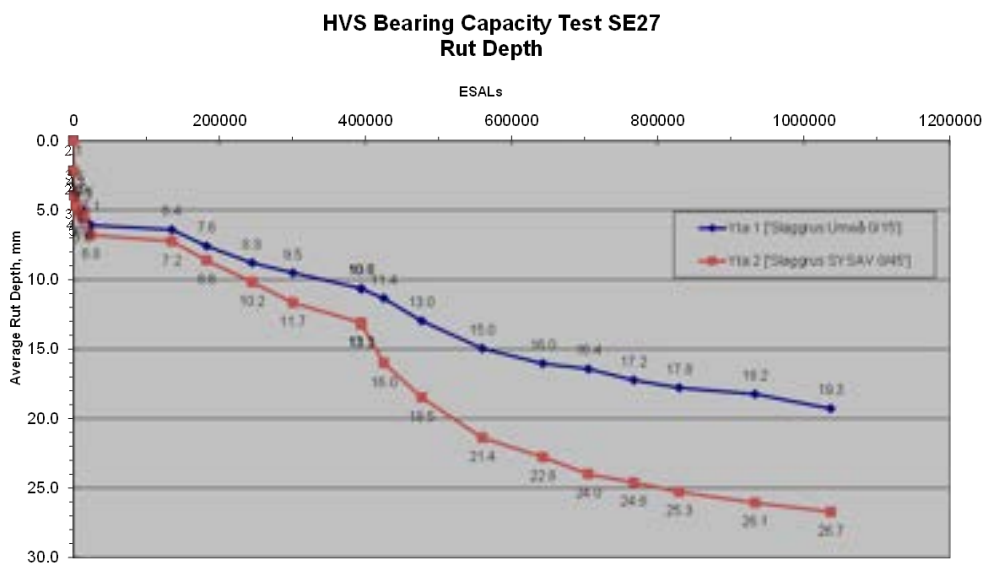
## Resultat från HVS körning

Försöken genomförs som tidigare beskrivits genom att ett lastbilshjul med belastning rullar över ytan. I denna typ av test kan stor trafikbelastning simuleras på kort tid, nästan 25000 hjulöverfarter kan göras på ett dygn. En överfart motsvarar en överfart med ett tungt lastbilshjul så om lastbilen har 2 axlar motsvarar det 12500 lastbilar. Belastning görs med en belastning som i slutet av försöket är något större än en standardaxel som är 50 kN. Resultatet redovisas i Figur 11 där x-axeln är antal överfarter och y-axeln visar genomsnittligt spår djup i millimeter. Lasten på hjulet ökades stegvis från 30 kN (0-500 överfarter), 40 kN (500-59 000 överfarter), 60 kN (59 000-200 000 överfarter) och 60 kN och grundvatten i terrassen 30 cm under förstärkningslager (200 000-500 000 överfarter). Den slutliga spår djupsutveckling kan sedan räknas om till standardaxlar ESALS för att kunna relatera till trafikklasserna och modellerade data (Figur 12). Resultatet från EMU (figur 13 Tabell 2) visar var deformationen har skett. Man kan se att det totala spår djupet är större än det uppmätta från EMU. Det beror på att EMU mäter bara i de obundna bär- och förstärkningslagren. Det betyder att en stor deformation även sker i andra lager såsom terrass, sättningslager och asfalt. Man kan förutsätta att en efterkompaktion sker i sättningslagret som består av 2/4 kross. Detta sker främst som en spår djupökning under de första 500 överfarterna. Man kan se att största bidraget till spår djup vid 400000 överfarter innan grundvattnet höjs i terrassen är förstärkningslagret med slaggruset.

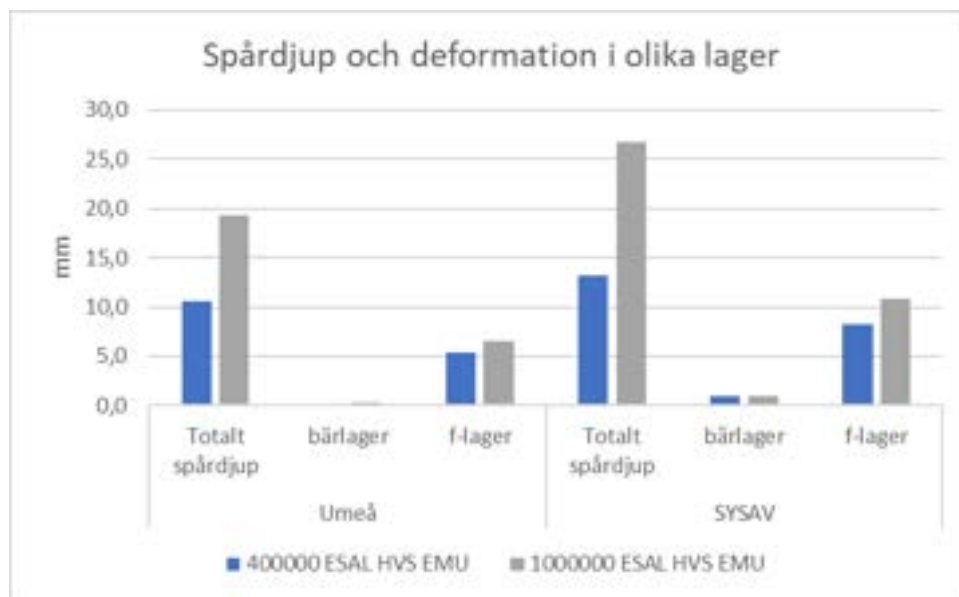
Efter grundvattnet tillförts fram till försöket avbryts ökar deformationerna och sannolikt sker dessa till största delen i terrassen där vattnet befinner sig.



Figur 11. Spårdjup från HVS försök, med verkligt antal överfarer



Figur 12. Korrigerat antal överfarer omräknat till ESALS eller standardaxlar.



Figur 13. Totalt spårdjup från HVS överfarter och deformationsdata från EMU instrumentering i mm

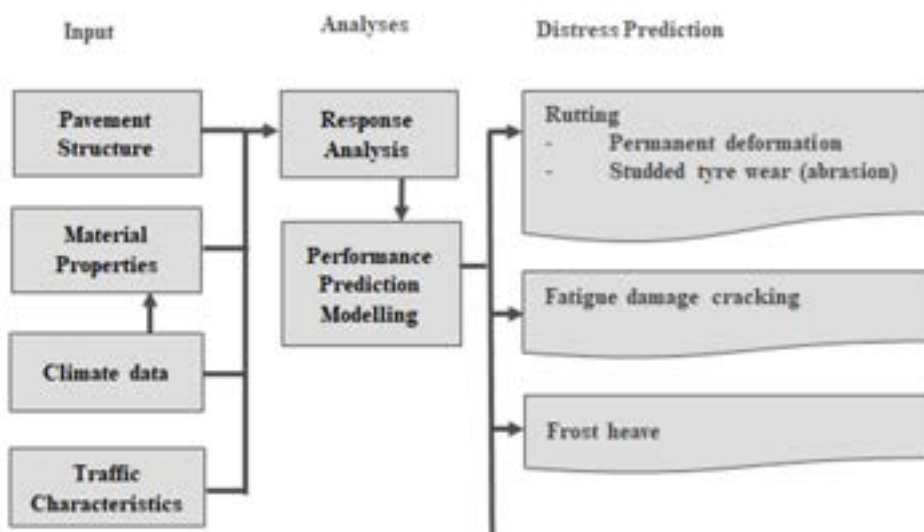
Tabell 2. Data visar i mm deformationer i de olika lagren. Det totala spårdjupet som mättes efter 400000 och efter 1000000 standardaxelöverfarter. F-lag är deformationer i förstärkningslager av slaggrus.

	Umeå			SYSAV		
	Totalt spårdjup	bärlager	f-lager	Totalt spårdjup	bärlager	f-lager
<b>Efter 400 000 ESALs</b>						
<b>HVS EMU</b>	10,6	0,2	5,4	13,2	0,9	8,3
<b>Efter 1 000 000 ESALs</b>						
<b>HVS EMU</b>	19,3	0,3	6,5	26,7	1,0	10,9

## ERAPave modellen

ERAPave (Elastic Response Analysis of pavements) är ett dimensioneringsverktyg som utvecklats vid Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI). Programmet använder mekanistisk-empirisk analysmodell för att prediktera spårdjup, utmattningssprickor och dubbdäcksslitage för vägkonstruktioner med kända materialegenskaper. Det går även att förutse tjällyft och stabilitet under stora statiska laster. Programmet är främst framtaget för flexibla vägkonstruktioner med asfaltsbeläggning men även semi-flexibla med markstensbeläggningar har gett resultat som går att validera under kontrollerade försök (Rahman et al 2018).

En materialdatabas med vanligt förekommande vägbyggnadsmaterial finns tillgänglig och är under ständig utveckling. Detta gör att dimensioneringsverktyget kommer förbättras och bli än mer användbart när fler material tillkommer. I klimatdata ingår temperatur och fuktighet vilket gör det möjligt att förutse vägkonstruktionens egenskaper och livslängd baserat på både trafikmängd och årstidsvariationer. Det är också möjligt att se effekter av olika klimatscenarier som tex om vägkonstruktionen blir utsatt för extrema temperaturer och fuktighet under olika perioder.



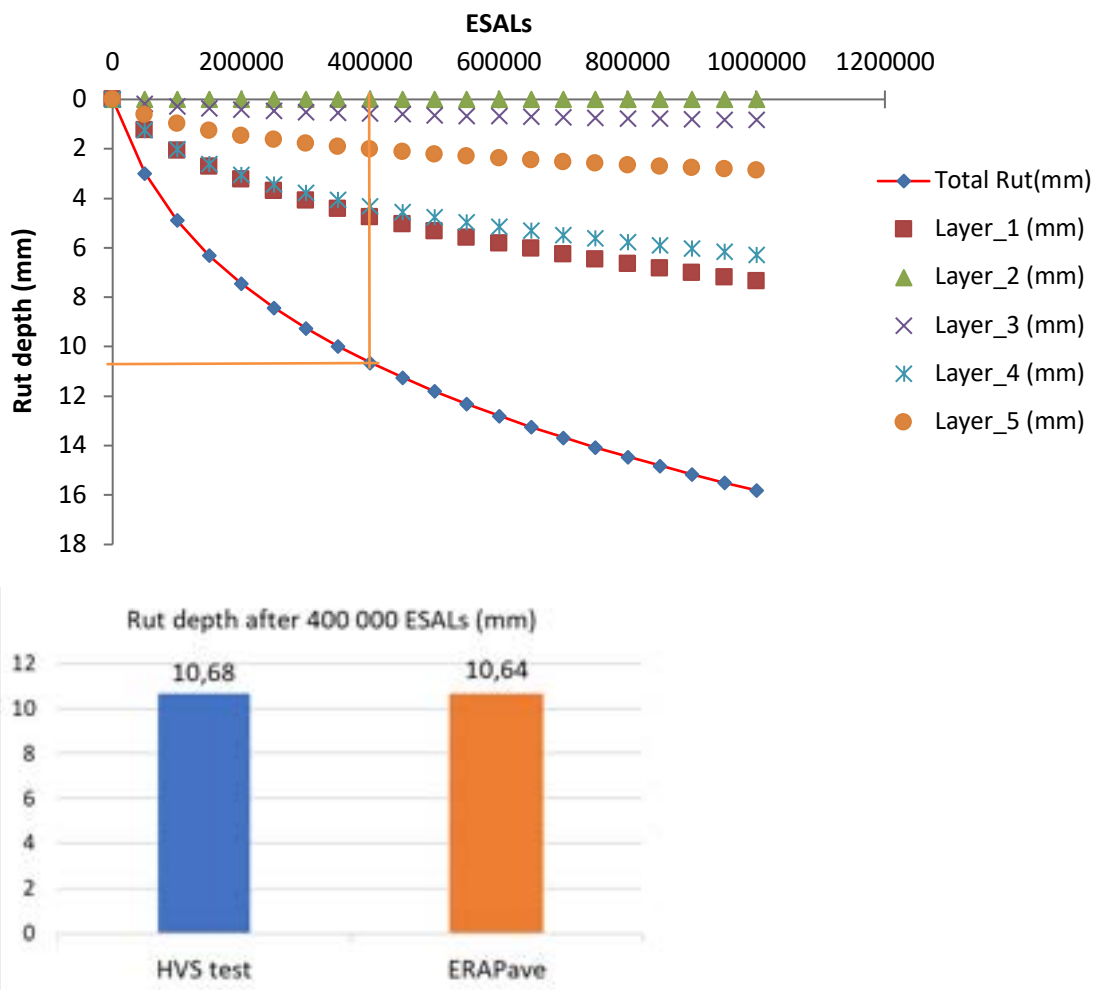
Figur 14. Beräkningsgången i ERAPave

## Verifiering av ERAPave modellen

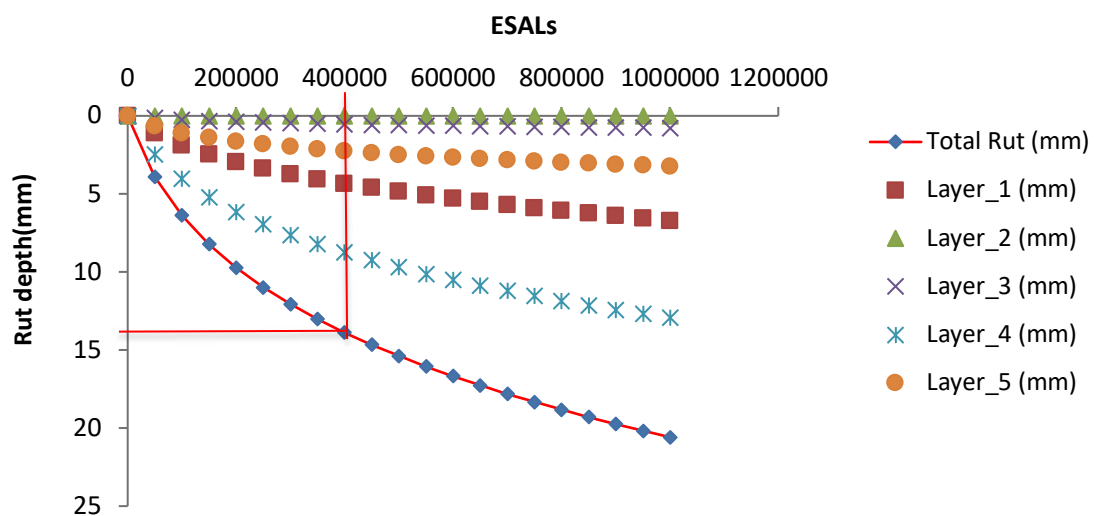
ERAPave bygger på mekanistisk-empirisk analys av materialdata (Figur 14). I denna rapport beskrivs verifieringsförfarandet översiktligt. Metoden beskrivs mer ingående i Rahman med flera (inskickad till TRA). De nödvändiga materialparametrarna erhålls från triaxaltester och mätning av permanenta deformationer. Dessa parametrar används för att modellera spårdjupsutveckling.

För att verifiera att modellen ger rimliga värden på spårdjup av en viss trafik, klimatdata och kända materialegenskaper har uppmätt spårdjup från HVS mätningen används som referens.

Figur 15 och 16 visar det modellerade spårdjupet och vid belastning av 400000 standardaxlar jämförs resultat med det erhållna spårdjupet i HVS-försöket. Anledningen att jämförelsen görs vid 400000 överfarter är att grundvatten tillförs i konstruktionen då och det gör jämförelsen lite mer komplicerad eftersom man måste ta hänsyn till detta.



Figur 15. Modellering av spårdjup (rut depth) i mm för konstruktionen byggd med Umeå-materialet och jämförelse med HVS-testet vid 400 000 överfarter av en standard axel (ESALS).



De data vi tagit fram i detta projekt kan man använda för att förutsäga en hur en konstruktion kommer att klara trafikbelastning över tid. Genom att använda verktyget ERAPave kan konstruktioner dimensioneras på ett sätt som säkrar att de kommer klara de belastningar som förväntas. Man kan optimera lagertjocklekar på konstruktionen så att både funktionsegenskaper och materialåtgång blir det ekonomiskt mest fördelaktiga. Detta ger trygghet för entreprenadföretaget som bygger och ägaren av anläggningen och bör minska tröskeln för att våga använda alternativa och återvunna ballastmaterial i anläggningsbyggande. Det är viktigt att man gör fortsatt uppföljning av byggda ytor och dess funktion. Vidare behöver man undersöka slaggrus i laboratorieskala från fler producenter för att få en uppfattning om spridningen i egenskaper mellan olika producenter.

De applikationer där slaggrus kan vara ett alternativ kan vara ytor av olika slag som industriytor, parkeringsytor samt gång- och cykelvägar.

## Miljövinster

Genom att använda lokalt producerade sekundära material som slaggrus som ersättning för jungfruligt sten- och bergmaterial uppnås en rad fördelar ut miljö- och klimatsynpunkt. Genom att återanvända, lokala, sekundära massor bidrar detta till en ett mer cirkulärt beteende där naturresurser sparas och en rad miljöpåverkande aktiviteter undviks som krossning av berg och transporter av ballast över långa avstånd. Våra livscykelanalyser (LCA) på två av materialen; slaggrus och krossad betong (fler är på gång) indikerar tydligt en lägre klimatpåverkan vid användning av dessa material jämfört med krossat berg. Genom att nyttiggöra slaggrus så minskar man också behoven av att deponera material som har egenskaper som gör dem användbara i byggande av infrastruktur. En förutsättning för att använda t ex slaggrus är att miljöpåverkan kan hanteras och att lokaliseringen är lämplig ur miljösynpunkt. Det krävs i dag en anmälan eller tillståndsansökan beroende på förutsättningarna för att använda avfallsklassade material som slaggrus för anläggningsändamål. En anmälan kan göras då föroreningsrisken är ringa. Om föroreningsrisken bedöms som mer än ringa är verksamheten tillståndspliktig och tillstånd ska sökas hos länsstyrelsens miljöprövningsdelegation. Samråd med den lokala miljömyndigheten under planeringsfasen är viktig för att reda ut huruvida lokaliseringen är lämplig och vilken provningsnivå som verksamheten faller under. Det är verksamhetsutövarens ansvar att påvisa risknivån i det aktuella fallet. Provningsnivåerna regleras i 34 § och 35 §, 29 kap, Miljöprövningsförordningen (2013:251).

## Slutsatser

Målsättningen är att underlätta för återvinning av slaggrus som infrastrukturmaterial och därmed bidra till ett mer cirkulärt och hållbart samhälle. Projektet har tagit fram underlag och materialparametrar för att kunna dimensionera konstruktioner med slaggrus. Data från HVS försöken visar att ERAPave modellen ger resultat som är nära varandra vilket ger trygghet i att modellen ger realistiska resultat. För att ta fram dimensioneringstabeller behövs mer empiriska data från byggda konstruktioner. Vidare krävs att gränsvärden för acceptabel spårdjupsutveckling och andra hållbarhetsaspekter tas fram. I dagsläget finns inte dessa kriterier framtagna. Det här arbetet är ett första steg i den riktningen. I förlängningen behövs bättre förståelse för materialet och dess funktion. Dimensioneringstabeller och kravnivåer underlättar upphandling. Beskrivning i regelverk som AMA anläggning som ofta används för offentlig upphandling ökar acceptansen för materialet från beställare och väghållare. Detta är del i förutsättningen av detta arbete.

Slutsatserna från dessa laboratorie och fullskaleförsök visar att:

- De uppmätta tekniska egenskaperna av de två slaggrusen från SYSAV i Malmö och Umeå energi visar att de inte uppfyller vissa av de krav som normalt ställs i AMA regelverket och av Trafikverket på obundna bergmaterial exempelvis styvhet, packningsegenskaper och kornkurva.

- Det betyder inte att dessa material är dåliga som byggmaterial men man behöver göra särskilda anpassningar. Det går alltså inte att tänka att dessa material direkt kan ersätta ett förstärkningslager av bergmaterial.
- Den lägre styvheten kan hanteras genom att använda verktyget ERAPave. Med materialparametrar kan konstruktioner dimensioneras på ett sätt som säkrar att de kommer klara de belastningar som förväntas. Man kan optimera lagertjocklekar på konstruktionen så att både funktionsegenskaper och materialåtgång blir det ekonomiskt mest fördelaktiga.
- Teoretiskt binder slaggmaterialen ihop över tid genom att mineralen reagerar med vatten via kemiska reaktioner och omkristallisation så man kan förvänta sig att konstruktionen blir styvare över tid. Styvhetstillväxten behöver studeras bättre.

De applikationer där slaggrus kan vara ett alternativ är ytor av olika slag som industriytor, parkeringsytor, gång och cykelvägar.



regelverket och av Trafikverket på obundna bergmaterial exempelvis styvhet, packningsegenskaper och kornkurva.

- Det betyder inte att dessa material är dåliga som byggmaterial men man behöver göra särskilda anpassningar. Det går alltså inte att tänka att dessa material direkt kan ersätta ett förstärkningslager av bergmaterial.
- Den lägre styvheten kan hanteras genom att använda verktyget ERAPave. Med materialparametrar kan konstruktioner dimensioneras på ett sätt som säkrar att de kommer klara de belastningar som förväntas. Man kan optimera lagertjocklekar på konstruktionen så att både funktionsegenskaper och materialåtgång blir det ekonomiskt mest fördelaktiga.
- Teoretiskt binder slagmaterialen ihop över tid genom att mineralen reagerar med vatten via kemiska reaktioner och omkristallisation så man kan förvänta sig att konstruktionen blir styvare över tid. Styvhetstillväxten behöver studeras bättre.

De applikationer där slaggrus kan vara ett alternativ är ytor av olika slag som industriytor, parkeringsytor, gång och cykelvägar.

## Referenser

Arm, M. 2006. Handbok Slaggrus i väg- och anläggningsarbeten. Information 18:5 SGI. RVF rapport 2006:08. Pp44.

Höbeda 1987. Slagg från sopförbränning som vägmateriel -En inventering av erfarenheter. VTI särtryck 118. Särtryck ur: Utnyttjning av slagg från avfallsförbränning SYSAV Reforsk nr 06, 1986 sida 17-52

Rahman, S., Simonsen E., och Hellman F. (2018). Performance of Different Types of Permeable Concrete Block Pavements in Accelerated Testing, 12th International Conference on Concrete Block Pavement, Oct. 16-19, 2018, Seoul, Korea

Rahman, S., Hellman, F., Schouenborg, B., Simonsen, E., and Erlingsson, S. (Submitted). Designing Pavements with Waste and Recycled Materials. Submitted to the 10th Conference, Transport Research Arena, TRA 2024, Dublin, Ireland.

Fråne, Anna och Johansson, Kristin (2021) Klimatnytta med att använda slaggrus som konstruktionsmaterial – Redovisning av livscykelanalys. Rapport 2021:08 Avfall Sveriges Utvecklingssatsning ISSN 1103-4092

Metodreferenser, HVS

- **Packningsegenskaper** på laboratorium, optimal vattenkvot och maximal torr skrymdensitet: modifierad Proctor
  - SS-EN 13286-2:2010/AC: 2013, Obundna och hydrauliskt bundna vägmateriel - Del 2: Provningsmetod för laboratoriemässig bestämning av referensdensitet och vatteninnehåll – Proctorinstampning (SIS/CEN)
- **Funktionella egenskaper styvhet och stabilitet** på obundna lager, Triaxialförsök
  - SS-13286-7:2004, Obundna och hydrauliskt bundna vägmateriel - Del 7: Treaxialtest för obundna vägmateriel (SIS/CEN)
- **Kornstorleksfördelning, siktning**
  - SS-EN 933-1:2012, Ballast - Geometriska egenskaper - Del 1: Bestämning av kornstorleksfördelning – Siktning (SIS/CEN)
  - TDOK 2014:0145, Bestämning av kornstorleksfördelning för grovkorniga materiel genom siktninganalys, Version 1.0, 2015-07-01 (Trafikverket)
- **Bärighetsegenskaper**
  - TDOK 2014:0141, Krav: Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning, Version 1.0, 2014-07-01 (Trafikverket)
    - (TDOK 2014:0141 bygger på den tyska standarden DIN 18134)
  - TDOK 2013:0530 Krav: Obundna lager för vägkonstruktion version 3.0 2017-11-24
- **Produktstandarder**
  - SS-EN 13242+A1:2007 Ballast för obundna och hydrauliskt bundna materiel till väg- och anläggningsbyggande (SIS/CEN)
  - SS-EN 13285:2018, Obundna överbyggnadsmateriel – Specifikationer (SIS/CEN)

# DIMENSIONERINGSUNDERLAG FÖR MARKKONSTRUKTION MED SLAGGRUS

Infrastrukturprojekt använder stora mängder resurser i samhället. För att minska klimatpåverkan är alternativa konstruktionsmaterial en väg framåt. Det saknas ofta viktiga materialspecifika parametrar för dimensionering av konstruktioner med sådana material. Det övergripande syftet med projektet har varit att få till en väl fungerande återvinning och cirkulär hantering av sekundära ballastråvaror och skapa förtroende för materialen i syfte att möjliggöra en ökad användning. Målet är att också förenkla användning av slaggrus. En systemanalys och genomlysning av affärsmodeller har ingått i projektet. Ett problem som identifierades var att materialmängden ofta är för liten för stora vägprojekt. Projektet har därför inriktat sig på användning i urban miljö där mindre volymer krävs och transportsträckorna är kortare. Det dimensioneringsprogram som används är ERAPave som är framtaget på VTI för Trafikverkets räkning och kommer ersätta nuvarande dimensioneringssystem.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktieföretag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på [energiforsk.se](http://energiforsk.se).

