

Jämförelse mellan mekaniska egenskaper och nedbrytning av hjullast, del 2

Håkan Arvidsson
Fredrik Hellman

Förord

Detta är ett fortsättnings- och kompletteringsprojekt, där nedbrytning från tung trafik på obundet bärlager jämförts med mekaniska egenskaper. Projektet har finansierats av Trafikverket med Klas Hermelin som kontaktperson. Styrgruppen har förutom undertecknad och Klas Hermelin bestått av Fredrik Hellman, VTI samt Urban Åkesson och Karl-Johan Lorents Trafikverket.

Tomas Halldin, Håkan Carlsson och Romuald Banek (samtliga VTI) har bistått med praktiska uppgifter.

Linköping april 2013

Håkan Arvidsson
Projektledare

Kvalitetsgranskning

Intern peer review har genomförts 3 november 2013 av laboratoriechef Håkan Carlsson. Håkan Arvidsson har genomfört justeringar av slutligt rapportmanus 21 januari 2014. Projektledarens närmaste chef, Björn Kalman har därefter granskat och godkänt publikationen för publicering 3 februari 2014. De slutsatser och rekommendationer som uttrycks är författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis myndigheten VTI:s uppfattning.

Quality review

Internal peer review was performed on 3 November 2013 by Håkan Carlsson. Håkan Arvidsson has made alterations to the final manuscript of the report 21 January 2014. The research director of the project manager Björn Kalman examined and approved the report for publication 3 February 2014. The conclusions and recommendations expressed are the authors' and do not necessarily reflect VTI's opinion as an authority.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	5
Summary	6
1 Bakgrund	7
2 Syfte, målsättning och begränsning	8
3 Metodik	9
3.1 Förberedelser	9
3.2 Nedbrytning/belastning	10
3.3 Provtagning.....	11
4 Material och dess egenskaper	12
5 Resultat.....	15
5.1 Packning	15
5.2 Spårbildning.....	16
5.3 Provtagning.....	17
5.4 Kornkurvor	17
5.5 Nedbrytning	23
5.6 Justering av resultat.....	24
6 Diskussion	26
6.1 Samband mellan nedbrytning och mekaniska egenskaper.....	26
6.2 Samband med spårdjupsutveckling	27
6.3 Trafikverkets kravnivåer för mekaniska analyser	28
7 Slutsats	30
8 Litteratur/referenser	31

Bilaga A Spårbildning

Bilaga B Provtagning

Jämförelse mellan mekaniska egenskaper och nedbrytning av hjullast, del 2.

av Håkan Arvidsson och Fredrik Hellman
VTI (Statens väg- och transportforskningsinstitut)

Sammanfattning

För att studera sambandet mellan nedbrytning av obundna bärlager och mekaniska egenskaper främst motstånd mot fragmentering (Los Angeles-test) men även nötningsmotstånd (micro Deval) har ett antal material belastats av VTI:s simulator för nedbrytning från tung trafik (HVS). Försöken utfördes i två omgångar en första omgång vintern 2010–2011 och i en andra omgång vintern 2011–2012. I varje omgång har fem material testats. I den andra omgången testades fyra nya och ett ”referensmaterial” från den första. I detta notat presenteras resultat och samband från omgång II och samband gemensamma för både omgång I och II. Resultat från omgång I redovisas i VTI notat 4-2011.

Nedbrytning har definierats som skillnad mellan kornstorleksfördelning före och efter test. Nedbrytningen kan beskrivas på olika sätt. Till exempel som skillnad i area under kurvorna. Den kan också beskrivas som summering av skillnaden för alla eller ett urval av siktar. Till exempel som ökning av andelen finmaterial då de finare siktarna 0,063–0,25 mm har använts.

Tvärprofiler har mätts med laser för att kunna beräkna spårdjupstillväxt och bedöma omlagring. Spårdjupet efter HVS-test är omvänt proportionellt mot ökning av finmaterial vilket kan tyda på att ökning av finmaterial ökar stabiliteten av den relativt öppna kornstorleksfördelningen. De material som har minst ökning av finmaterial har störst andel av hårda mineral (kvarts och plagioklas).

Slutsatsen av dessa två HVS-försök på obundna bärlager är att det till viss del går förklara nedbrytning (förändring av kornstorleksfördelning) med mekaniska egenskaper (som Los Angeles och micro Deval). De korrelationer som styrker sådana samband beskrivna ovan är dock mycket hjälpta av ett extremt material, N. Hellman et al (2013) visar att nedbrytning och krossning av ballastkornen vid kompaktering har ett samband med de mekaniska analyserna genom att studera mikrostruktur och nedkrossningsgrad. Man kan därför dra slutsatsen att det sker en nedkrossning vid packning med vält och trafik av tunga fordon på exponerade obundna bärlager.

Hellman et al (2013) visar i ett parallellt projekt att nedbrytning från vält har samband med mekaniska egenskaper. Den omlagring som orsakas av HVS gör nedbrytning mindre tydlig.

Comparison of the mechanical properties and degradation of wheel load, part 2

by Håkan Arvidsson and Fredrik Hellman

VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute)

Summary

To study the correlation between the degradation of unbound base layer and mechanical properties (primarily Los Angeles test but also micro Deval test) a number of materials has been exposed by wheel load of VTI's Heavy Vehicle Simulator (HVS). The first round was performed during the winter 2010–2011 and the second round during the following winter. In each round there were five materials tested. In the second round there were four new materials and one “old” as reference material. In this report results from round II will be presented, as well as some common results from both of the rounds, I and II. The results from round I are presented in VTI notat 4-2011.

The degradation has been defined as the difference in grain size distribution before and after HVS test. The degradation can be described in several ways. One way is as the difference in the area under the grain size distribution curve, another way is to sum the difference in percentage passing for all sieves or a few, e.g. the increase of fines by using results from the sieves 0.063–0.125 mm.

The rutting has been measured by laser. The rutting is inversed proportional to the increase of fines. The increase of fines probably increases the stability in this quite coarse base layer grading. The materials with less increasing of fines have most of the hard minerals (quartz and plagioclase).

The conclusion of these two tests on unbound base layer materials is that you partly can explain the degradation (change of grain size distribution) with mechanical properties (like Los Angeles and micro Deval). The correlations confirm this explanation and depend partly on an extreme material. Hellman et al (2013) show that degradation and crushing of the aggregates during compaction have a correlation with mechanical properties by studying microstructure and degree of crushing in microscope. Therefore the conclusion is that there is a degradation and crushing of aggregates in unbound base layer materials exposed by compaction and heavy traffic load.

In a parallel research project Hellman et al (2013) show that, the degradation from compaction by a roller has a correlation with mechanical properties. The degradation was studied in in-situ-samples in microscope. Particle relocation that appears during HVS-test makes that correlation hard to detect.

1 Bakgrund

Trafikverket har ett krav på obundet bärlager i TRVKB 10 Obundna lager på motstånd mot fragmentering (nedkrossning). Den egenskapen bestäms med Los Angelesvärde (LA) som skall vara max 40. För att studera relevansen för det kravet och jämföra med nedbrytning i obundna lager från i huvudsak byggtrafik genomfördes 2010-2011 ett projekt med VTI:s Heavy Vehicle Simulator (HVS) vilket har beskrivits i VTI notat 4-2011 ”Jämförelse mellan Los Angeles-värde och nedbrytning från hjullast”.

I ovan nämnda projekt testades fem material vilket ansågs som något för få. För att utöka antalet material och förbättra det statistiska underlaget i sambanden mellan LA och nedbrytning utfördes ett fortsättningsprojekt, benämnt försök II. I det nya projektet testades fem material igen, fyra nya plus upprepning av ett från första försöksomgången.

Fortsättningen med försök II beskrivs och rapporteras i detta notat.

2 Syfte, målsättning och begränsning

Syftet med detta arbete är att söka samband mellan motstånd mot fragmentering (LA) och nedbrytning från hjullast.

Målsättningen med projektet är att framställa ett empiriskt underlag för att pröva tillämpligheten av kravnivån $LA \leq 40$ för valda bergkrossmaterial. (Vidare ska, om så visas, underlaget användas vid "trimning" av kravnivån $LA \leq 40$.)

Detta fortsättningsförsök utfördes på tre nya granitiska, ett granitiskt från förra försöket samt ett gabbroidiskt ballastmaterial med "mycket" högt LA-värde. Proverna har testats på laboratorium för bestämning av grundläggande egenskaper (som kornkurva och LA m.fl.). Nedbrytningen från hjullast (byggtrafik) har skapats med HVS, där ett av delmålen var att se om man kan detektera nedbrytning från tung hjullast. Ett annat delmål var att se om man sedan kan göra en koppling av denna nedbrytning och till Los Angelesvärde och/eller möjligen micro-Deval.

3 Metodik

Metodiken använd i detta projekt stämmer överens med den använd i föregående projekt, VTI notat 4-2011.

3.1 Förberedelser

De material som använts har levererats som bärlager (0/32 mm). De har sedan delats upp i fraktioner för att proportioneras till önskad kurva, se kapitel 4 Material.

Inför test i HVS har ett antal tester utförts på laboratoriet som:

- Kornstorleksanalys med tvättsiktning, enligt SS-EN 933-1
- Flisighetsindex enligt SS-EN 933-3
- Motstånd mot nötning, micro-Deval (våt), enligt SS-EN 1097-1
- Motstånd mot fragmentering (nedkrossning), Los Angeles, enligt SS-EN 1097-2
- Korndensitet, vägning under vatten – förtorkat, enligt SS-EN 1097-6 bilaga A

Den ”form” som användes för försök I har använts även för försök II. Formen bestod av grunder från tidigare HVS försök (Test benämnt SE11 med normal konstruktion från ATB Väg). Tre sidor av formen består av asfaltsbeläggning och den fjärde av träreglar.

Materialen lades i fil på testytan som var 5 x 1 m. Mellan materialen placerades en tunn masonitskiva som materialskiljare.

Materialen lades ut i sex limpor tvärs riktningen för belastningshjulet. Varje limpa bestod av delprov på 28 kg som i sin tur bestod av 2 homogena 14 kg-prover plus 2,5 % vatten. Materialmängderna är beräknade att ge en tjocklek på ca 8 cm. En antagen skrymdensitet på 2,1 Mg/m³ ger totalt 168 kg torrt material (6x2x14). För material N (se kap 4) som har en betydligt högre korndensitet och därmed en förmodad högre skrymdensitet än övriga har mer material använts, 182 kg (6x2x14+14).

Det utlagda och avjämnade materialet packades först med en mindre vält (trottoarvält) med 8 släta överfarter. Sedan vattnades materialet och packades ytterligare med 8 släta överfarter samt 4 överfarter med vibro.

Den avslutande packningen gjordes med hjulbelastning enligt ett förbelastningsprogram (preload) med HVS, se 3.2.1.

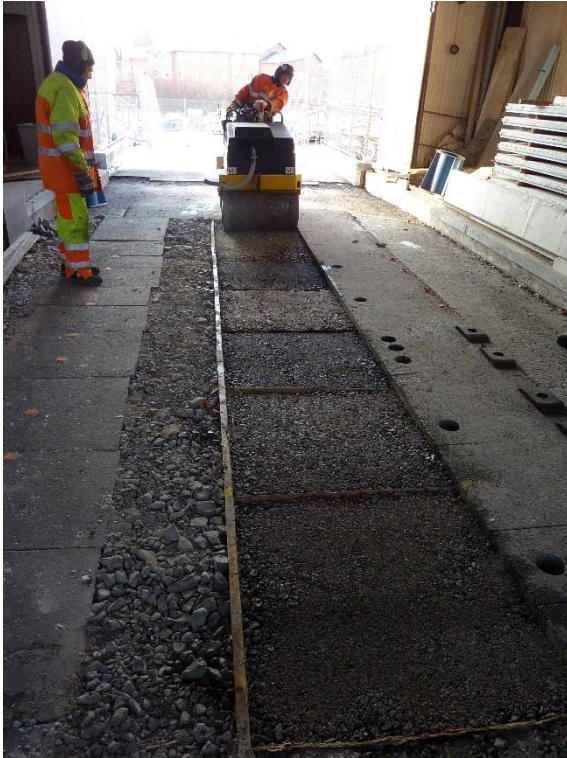


Bild 1. Packning av provtytor.

3.2 Nedbrytning/belastning

Belastningen med HVS utfördes i två delar bortsett från förbelastningen. Belastningshjulet var ett s.k. Super singel (dimension 425/65R22,5) med ringtryck 800 kPa och belastade materialet i båda riktningarna. Temperaturen har inte styrts utan naturlig temperatur har fått råda, vilket tyvärr inneburit risk för temperaturer under noll grader under försökets gång. Testytan har vid uppehåll i HVS-körningarna (nätter och helger) täckts med plast för att undvika uttorkning, och med isolering för att undvika tjälnedträngning.

3.2.1 Förbelastning

- Belastning: 30 kN (3 ton, motsvarande axellast 6 ton)
- Hastighet: 4 km/h
- Antal belastningar: 540
- Sidläge: jämnt fördelat över hela bredden (± 25 cm)

3.2.2 Huvudförsöket

- Belastning: 60 kN (motsvarande axellast 12 ton)
- Hastighet: 6 km/h
- Antal belastningar: 23 000
- Sidläge: normalfördelat ± 15 cm (total spårbredd 60 cm inkl. däcksbredd))

3.2.3 Slutfasen

För att accelerera nedbrytningen ytterligare gick sista delen av testen endast i mittspåret.

- Belastning: 60 kN (motsvarande axellast 12 ton)
- Hastighet: 8 km/h
- Antal belastningar: 2 000 (från överfart 23 000 till överfart 25 000)
- Sidläge: centrumläget



Figur 1. HVS - Heavy Vehicle Simulator.

3.3 Provtagning

Provtagning gjordes mitt i belastningsspåret. Ytan på provgropen var 60 x 20 cm och hela tjockleken provtogs i ett övre och undre lager. Total tjocklek är ca 8 cm. För resultat av hela provet summerades delarnas vikter.

Prover togs också av varje material utanför HVS:ens belastningsspår, ute vid kanten. Ett delprov i övre lagret (ca 4 cm) vid varje kant och ett delprov i undre lagret vid varje kant. Varje delprov analyserades separat och summerades till prov per skikt och totalprov per material.



Bild 2. Provtagning.



Bild 3. Djupmätning.

4 Material och dess egenskaper

I detta fortsättningsprojekt har fyra nya material använts och ett från första försöket har använts som referens. Totalt fem material.

Av de nya materialen är tre granitiska och det fjärde en gabbroid. Materialen är valda för att få stor spridning men även att få höga LA-värden. Materialet från första försöket är även det granitiskt.

Materialen benämns med kodbokstav/kodbeteckning. De material som testats i omgång II är: "S" som referens samt "St", "T", "E6" och "N".

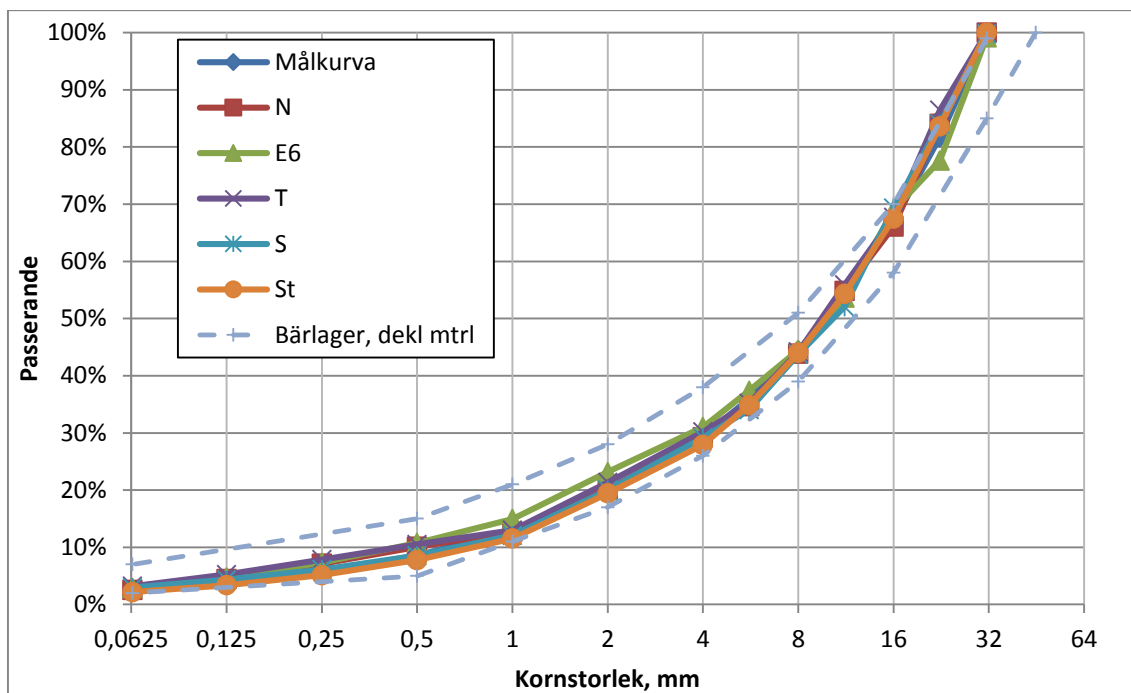
En kort beskrivning av materialen och resultat från mekaniska och geometriska egenskaper redovisas i Tabell 1 och illustreras i Figur 3.

Tabell 1. Materialegenskaper. LA = Los Angelesvärde, M_{DE} = micro-Devalvärde, FI = flisighetsindex och ρ_p = korndensitet.

Försök	Beteckning	LA	M_{DE}	FI	ρ_p	Bergart
I	H	36	8	14	2,63	Medelkornig granit, röd-grå (röd BL-mix)
I	V	28	16	21	2,80	Glimmerrik gnejs (m. fältspatögon), grå (mörkgrå BL-mix)
I	S	21	5	27	2,64	Fin- medelkornig granit, grå-röd
I	F	38	9	17	2,64	Fin- medelkornig granit, röd-grå (inslag av grått mer vittrat berg) (röd BL-mix)
I	K	34	10	16	2,69	Ortognejs (granitisk), grå-svart-vit (mörkgrå BL-mix)
II	N	62	38	7	3,15	Amfibolit, svart
II	E6	44	11	10	2,63	Medelkornig granit, ljus
II	T	29	18	16	2,74	Gnejsig granit, mörk
II	S	21	5	27	2,64	Fin- medelkornig granit, grå-röd
II	St	27	9	21	2,74	Medel- grovkornig kvarts monzonit (granit), röd

Samtliga material har siktats upp i fraktioner för att sedan proportioneras till samma målkurva som i försök I. Målkurvan är en s.k. Fullerkurva:
andel passerande = $100\% \times (\text{aktuell sikt/största sten})^n$; där $n = 0,593$

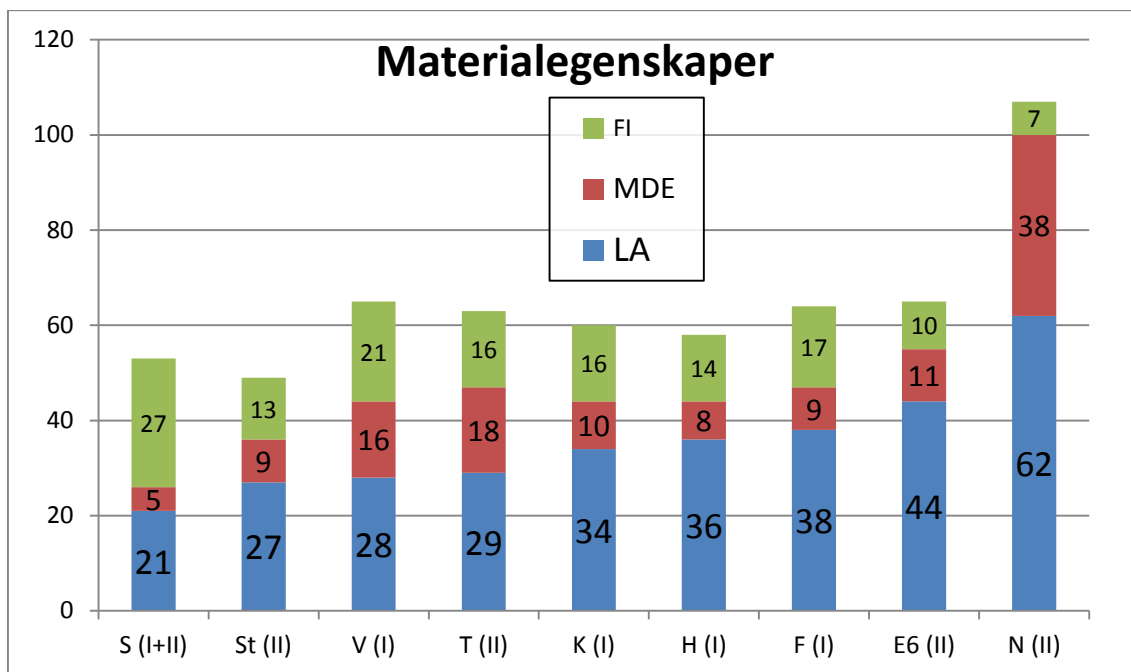
Resultaten av proportioneringen visas i Figur 2 och Tabell 2. Dessa resultat kommer också användas som "före resultat" vid bedömning av nedbrytning.



Figur 2. Kornstorleksfördelning för provmaterialen i försök II.

Tabell 2. Andel passerande för respektive material inklusive Målkurvan (Fuller).

Sikt, mm	Målkurva	N	E6	T	S	St
31,5	100 %	100 %	99 %	100 %	100 %	100 %
22,4	82 %	84 %	78 %	86 %	84 %	84 %
16	67 %	66 %	69 %	68 %	69 %	67 %
11,2	54 %	55 %	54 %	56 %	52 %	54 %
8	44 %	44 %	44 %	44 %	44 %	44 %
5,6	36 %	35 %	37 %	35 %	34 %	35 %
4	29 %	29 %	31 %	30 %	29 %	28 %
2	20 %	20 %	23 %	21 %	20 %	19 %
1	13 %	13 %	15 %	13 %	12 %	12 %
0,5	9 %	10 %	11 %	11 %	9 %	8 %
0,25	6 %	7 %	7 %	8 %	6 %	5 %
0,125	4 %	4 %	5 %	5 %	4 %	3 %
0,063	2,5 %	2,5 %	2,9 %	3,2 %	3,0 %	2,2 %



Figur 3. Grafisk illustration av mekaniska egenskaper. Försök I och/eller II inom parentes. LA = Los Angelesvärde, MDE = micro-Devalvärde, och FI = flisighetsindex.

Resultaten från de mekaniska analyser (LA och M_{DE}) som gjorts innebär att ju högre värde desto sämre material. Ett högt flisighetsindex (FI) indikerar indirekt en sämre funktion mekaniskt. Summering av resultat från dessa analyser illustreras i Figur 3.

5 Resultat

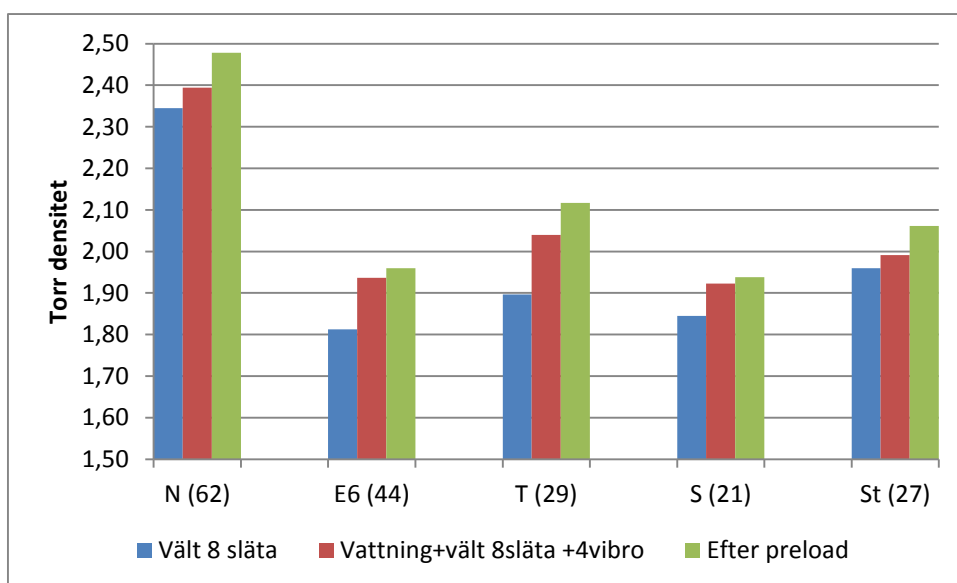
Resultaten redovisas i första hand för försök II separat. Där det är relevant hänvisas till VTI notat 4-2011 för omgång I.

5.1 Packning

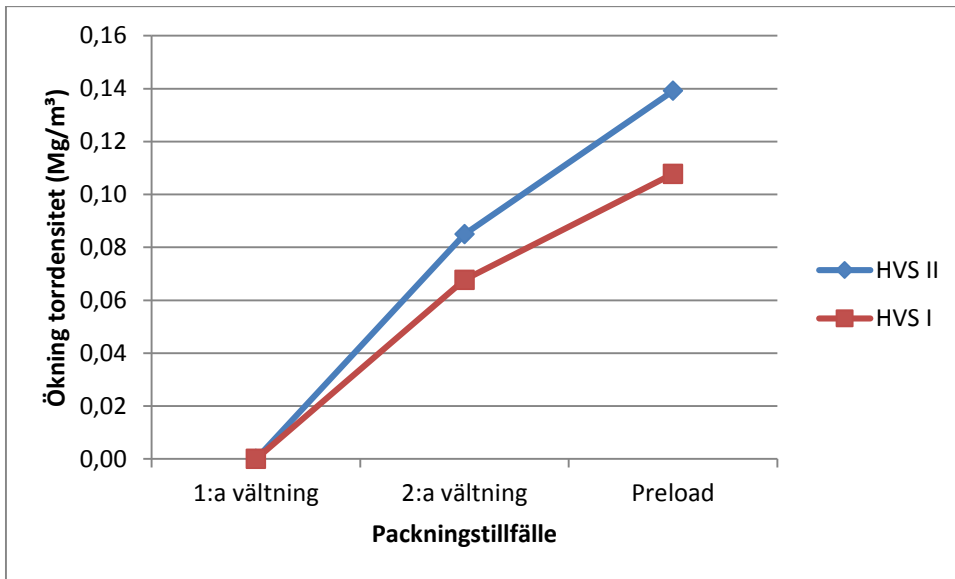
Packning av ytorna kontrollerades med isotopmätare i ”backscatterläge”, utan att föra ned sonden med strålningskällan i materialet. Mätning utfördes vid tre tillfällen och resultaten redovisas i Tabell 3 och Figur 4. För varje packningsinsats ökar torrdensiteten. I jämförelse med försök I är ökningen av torrdensitet något större för försök II, se Figur 5.

Tabell 3 Packningstabell med medelvärde för torrdensitet.

Packningsarbete i kronologisk ordning	Torr skrymdensitet <i>medel alla ytor</i>
Trottoarvält 8 överfarter, fuktigt.	1,97 Mg/m ³
Trottoarvält efter vattning + 8 släta + 4 vibro vältöverfarter	2,06 Mg/m ³
Förbelastning med HVS 540 överfarter, 30 kN	2,11 Mg/m ³



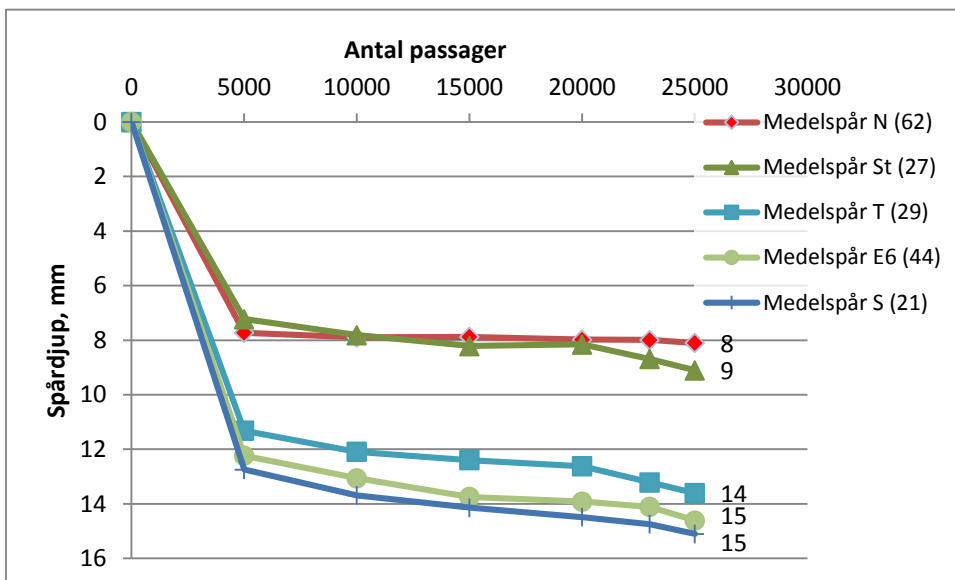
Figur 4. Torrdensitet för varje material efter varje packningssteg. (LA inom parentes).



Figur 5. Ökning av medeltorrdenstet (Mg/m^3) för respektive försöksomgång (I och II).

5.2 Spårbildning

Spårutveckling har mätts med laserprofilometer i princip vid var 5000:e överfart. Två linjer per material. Medelvärde för varje material redovisas i Figur 6. Den största delen av spårdjupet uppkom i början av testet. Tvärprofiler och enskilda mätlinjer redovisas i bilaga A. Man kan urskilja två grupper, en ger spårdjup på 8-9 mm och en annan ger spårdjup på 14-15 mm (Figur 6).



Figur 6. Spårdjupsutveckling som medelvärde för varje material (LA inom parentes).

5.3 Provtagning

I samband med provtagning mättes lagertjocklek av materialet samt tjockleken av övre lagret. Tjocklekarna mättes i tre punkter, på en halv centimeter när, medelvärden redovisas för varje material i bilaga B. Medelvärden för hela försök II redovisas i Tabell 4. Värdena för övre lagret i spåret varierar mellan 4,0-5,2 cm och hela tjockleken varierar mellan 7,3-9,0 cm.

I samband med kornstorleksfördelning på väglaboratoriet bestämdes torrvikterna för respektive delprov, dessa redovisas i bilaga B. Medelvärden för hela försök II redovisas i Tabell 4. Provvikterna för spåret varierar i övre lagret mellan 8,9-12,7 kg, det undre lagret varierar mellan 10,3-13,1 kg. Provvikterna för hela tjockleken i spårproverna varierar mellan 22,2-25,9 kg.

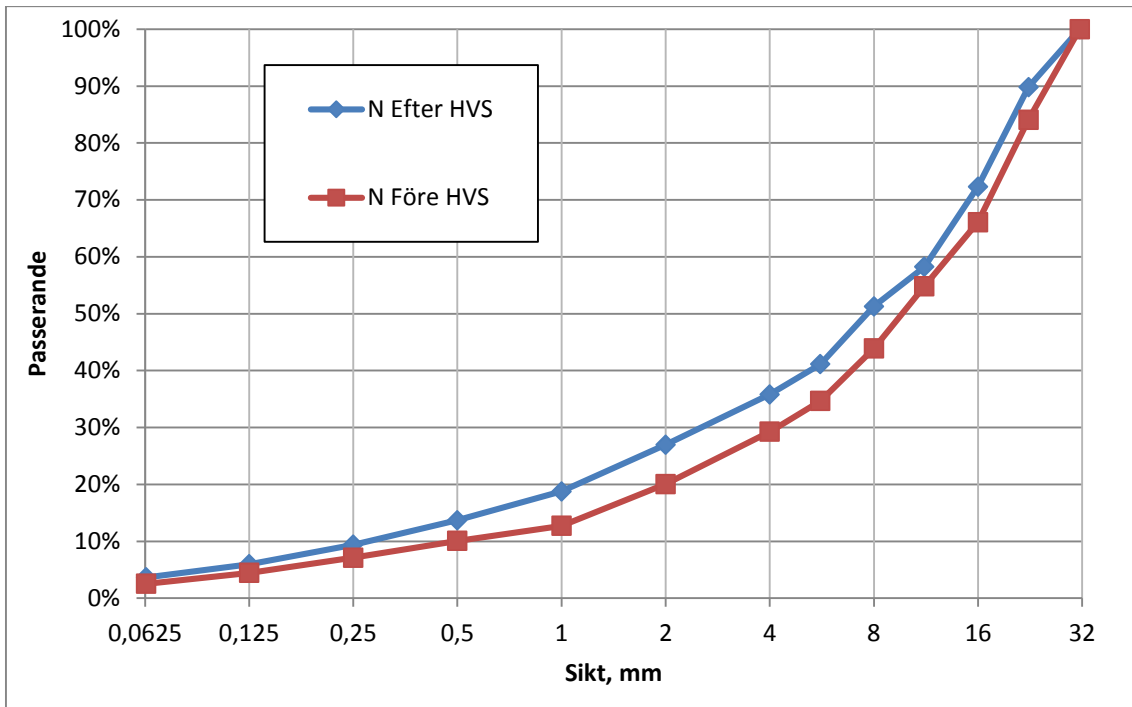
Provtjocklekar och provvikter redovisas mer detaljerat i bilaga B.

Tabell 4. Provtagningsdata, medelvärden för hela försök II.

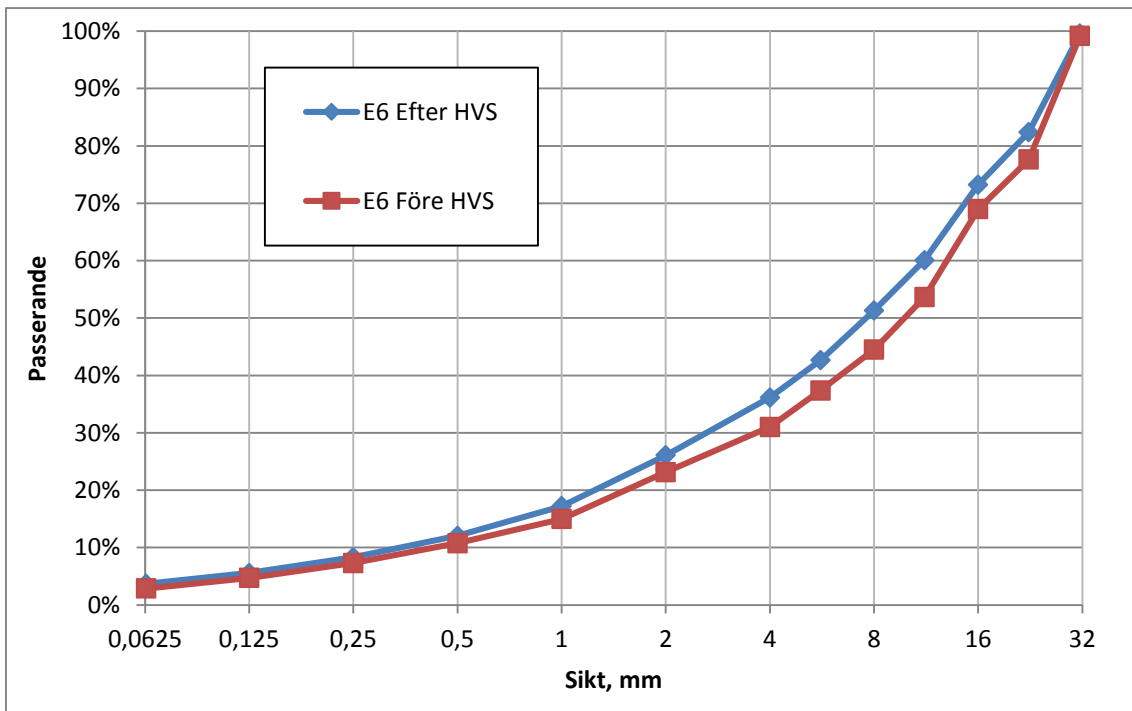
	Spåret			Kantprover		
	Övre	Undre	Totalt	Övre	Undre	Totalt
Tjocklekar	4,7 cm	3,8 cm	8,5 cm	4,7 cm	3,8 cm	8,5cm
Provvikter	11,4 kg	12,1 kg	23,5 kg	5,7 kg	5,3 kg	11,0 kg

5.4 Kornkurvor

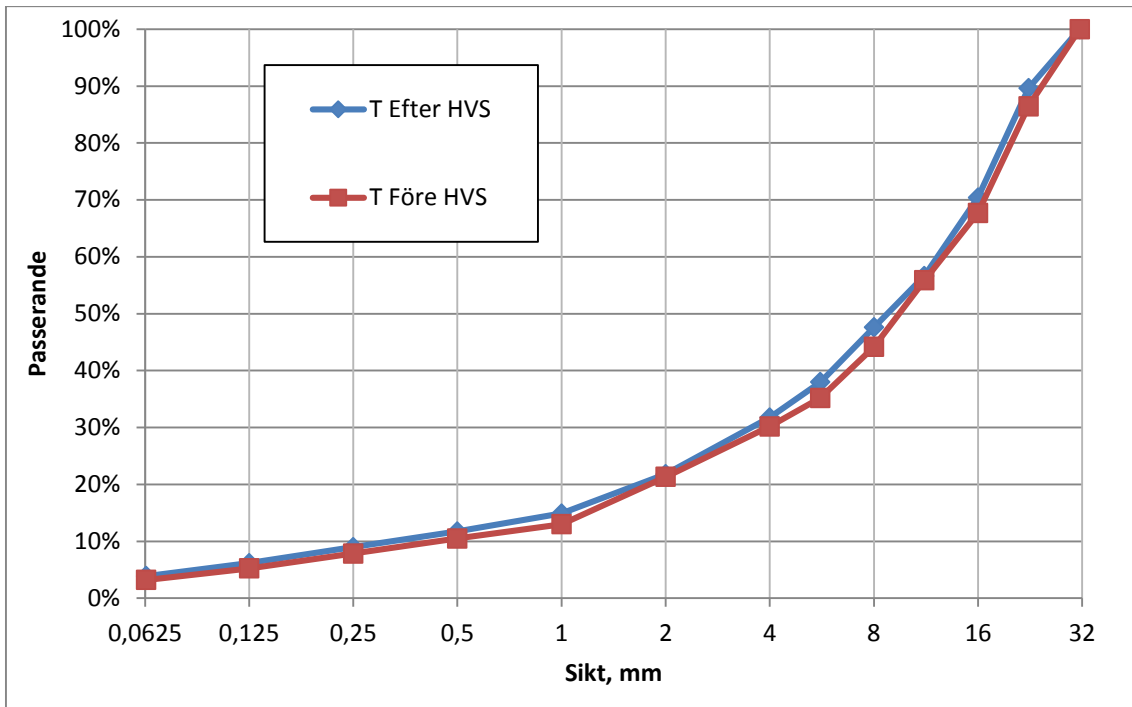
Utvärdering av nedbrytningen från hjullasten gjordes genom att bestämma kornstorleksfördelning på testmaterialen efter test. I Figur 7 till Figur 11 redovisas kornkurvorna efter test för respektive material jämfört med ”före kurvan”. Kurvorna efter test är beräknad på summaprov efter provtagning (allt provtaget material på hela provgropsdjupet, hela tjockleken), se även 5.3 och bilaga B.



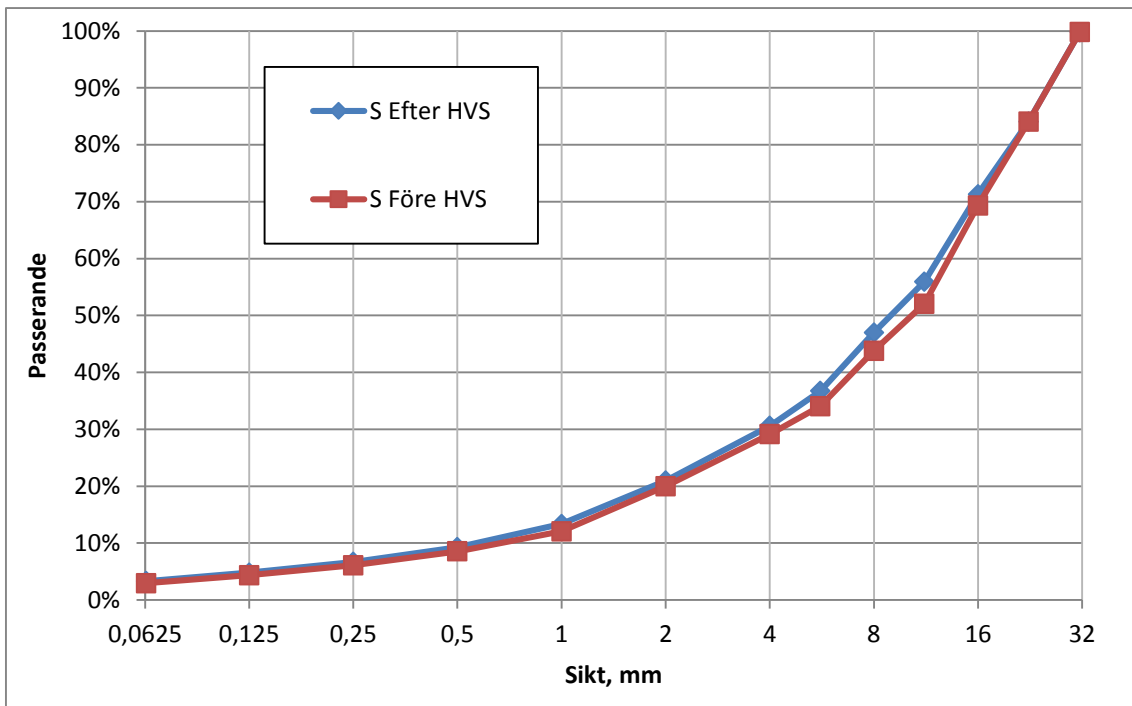
Figur 7. Material N (LA 62, M_{DE} 38). Kornkurvor före och efter test.



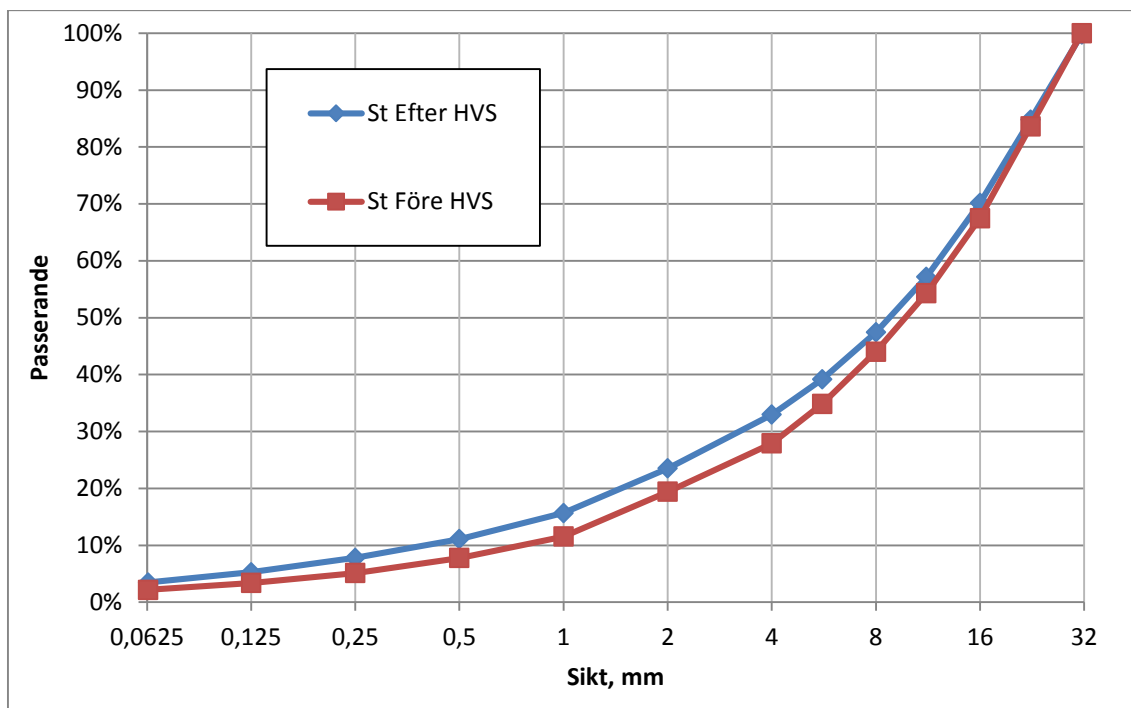
Figur 8. Material E6 (LA 44, M_{DE} 11). Kornkurvor före och efter test.



Figur 9. Material T (LA 29, M_{DE} 18). Kornkurvor före och efter test.



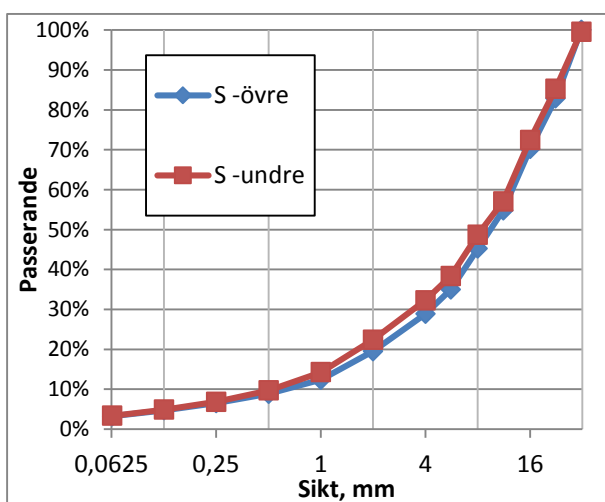
Figur 10. Material S (LA 21, M_{DE} 5). Kornkurvor före och efter test.



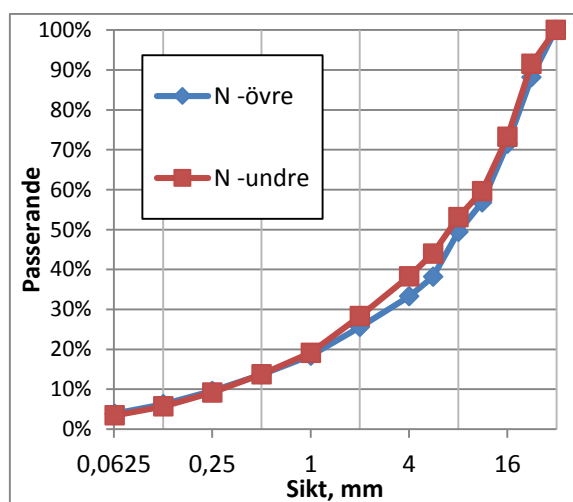
Figur 11. Material St (LA 27, M_{DE} 9). Kornkurvor före och efter test.

Skillnaderna i kornstorleksfördelning mellan före och efter belastningsförsök sammanställs i Figur 17.

Redan i försök I framkom att materialet efter test var finare i det undre skiktet generellt än i det övre, Arvidsson 2011. Exempel på det från försök II visas i Figur 12 för material S och i Figur 13 för material N. Särskilt tydligt i dessa exempel är det kring sikt för 4 mm.



Figur 12. Skillnad mellan övre och undre lager för material S.

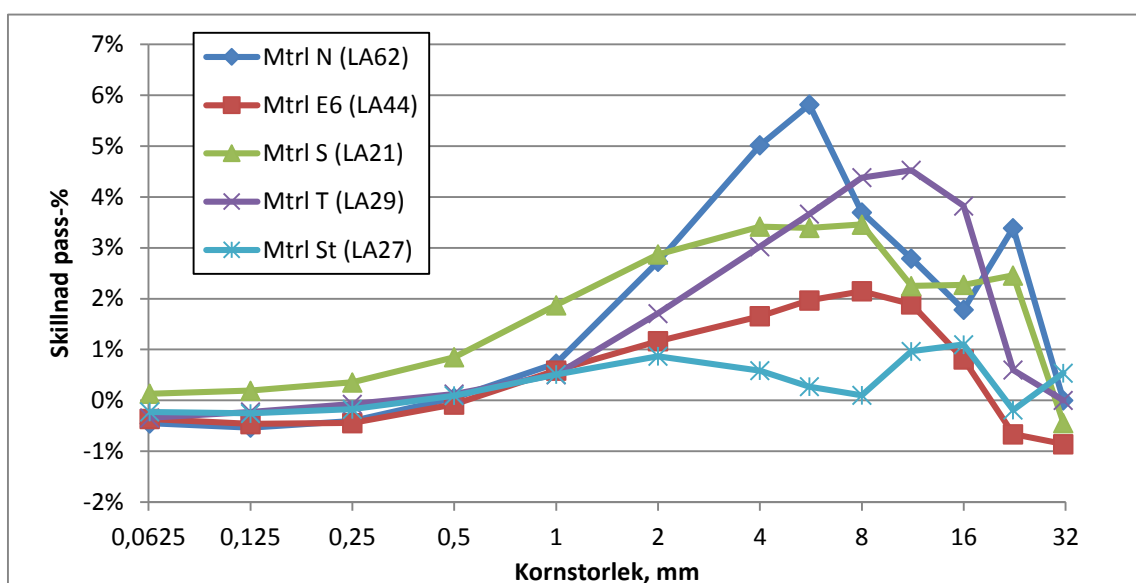


Figur 13. Skillnad mellan övre och undre lager för material N.

Skillnaderna för samtliga material mellan övre och undre lagret sammanställs i Tabell 5 och illustreras i Figur 14. Värdet (andelen passerande) för varje sikt för undre skiktet subtraheras med värdet för övre skiktet.

Tabell 5. Differensen mellan passerande mängd i det övre skiktet och undre skiktet summerad för alla siktar och för de finare siktarna. Positivt värde innebär att det undre lagret är finare än det övre.

Material	N	E6	T	S	St
Summa alla siktar	24,6	7,4	21,7	23,1	4,2
Findelen 0,063-0,25	-1,4	-1,3	-0,6	0,7	-0,7

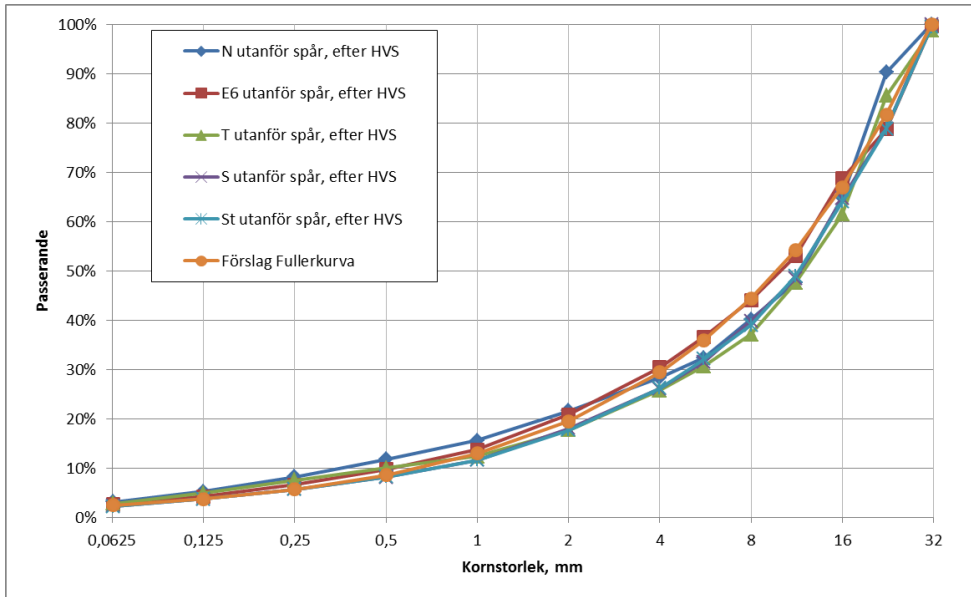


Figur 14. Differensen mellan övre och under skikt. Positivt värde innebär att det undre lagret är finare.

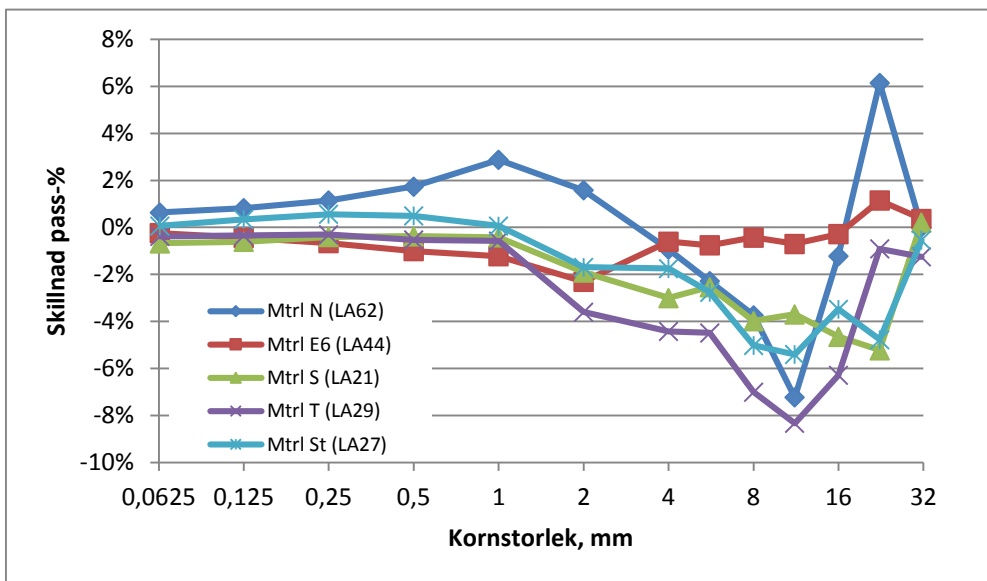
Skillnaden mellan före och efter redovisas som nedbrytning i kapitel 5.5.

5.4.1 Kornkurva utanför belastningsspår

Kornstorleksfördelningen utanför belastningsspåret är provtaget ända ute vid kanten. Det materialet har bara påverkats av vält och delvis av HVS vid ”preload”. Kornstorleksfördelning av dessa prover redovisas Figur 15. Skillnaden mellan ursprunglig kornstorleksfördelning, ”före-kurvan”, och provtaget kantmaterial redovisas i Figur 16.



Figur 15. Kornkurvor utanför spåret.



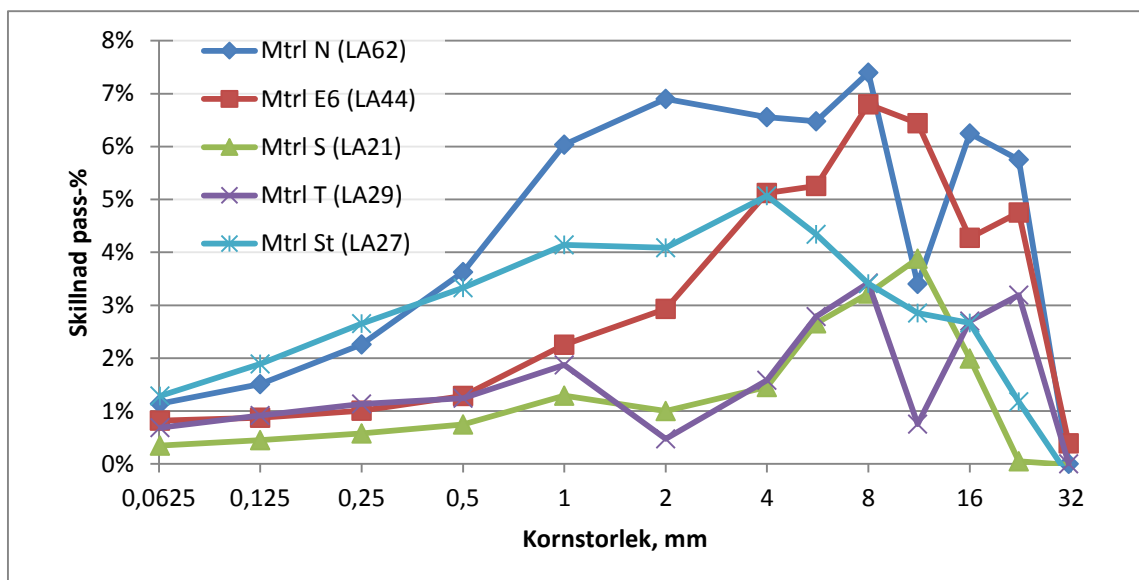
Figur 16. Skillnad mellan kantprov och "före-kurva". Positivt värde innebär att "efter" är finare.

Delar av kurvorna i Figur 16 är negativa vilket innebär att proverna är grövre jämfört med ursprungsmaterialet. Det kan bero på viss separation vid utläggning eller omlagring av grusmaterialet (2-32 mm).

5.5 Nedbrytning

Det går att visa på nedbrytning på flera sätt. Nedan visas ett antal exempel beräknat på hela tjockleken (summaprov) från försök II.

Man kan också summera dessa skillnader med eller utan mellansiktar (som mellansiktar räknas 5,6; 11,2 och 22,4 mm).



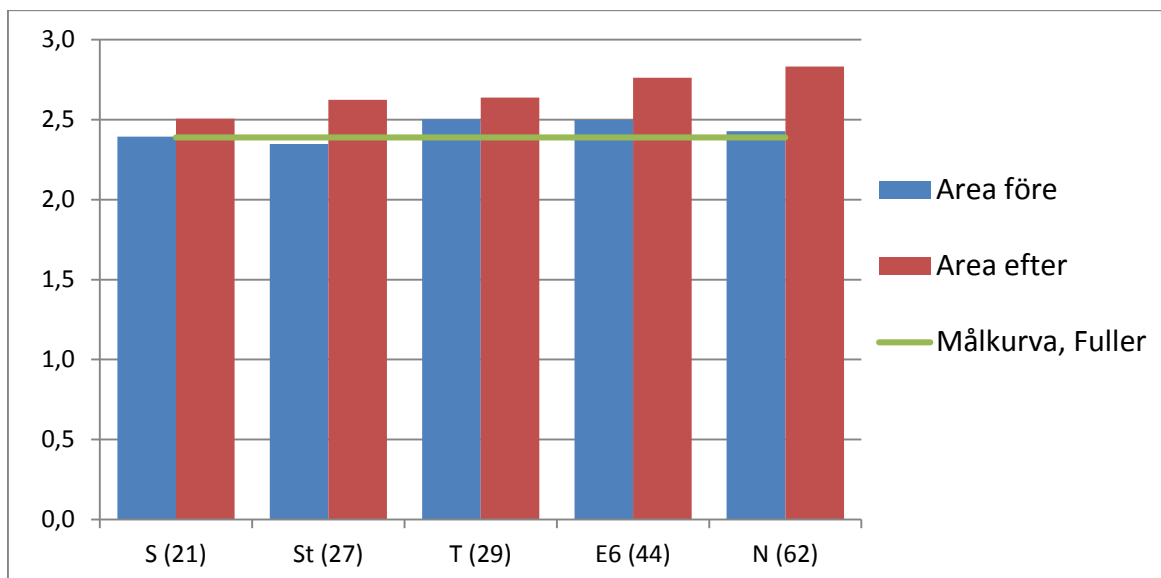
Figur 17. Skillnad i kornstorleksfördelning mellan ”efter” och ”före” test i HVS.

Nedbrytning som skett under HVS-försöken kan visas som skillnad i kornstorleksfördelning mellan efter test och före test vilket visas i Figur 17 och i Tabell 6.

Tabell 6. Differensen för varje sikt summerad för: alla siktar, utan mellansiktar och för de finare siktarna. [%]

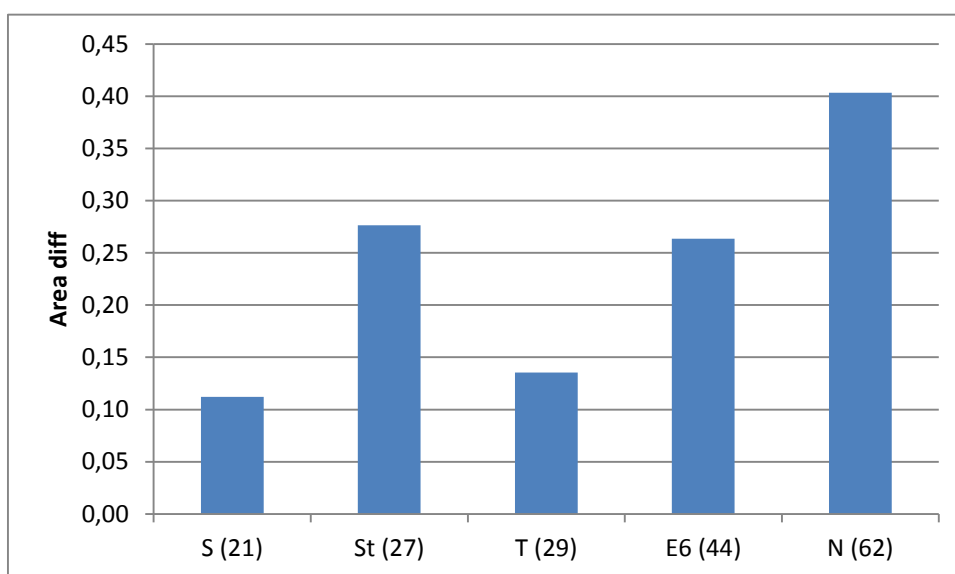
Material	N	E6	T	S	St
Summa diff alla siktar	57,3	42,4	20,8	17,7	26,7
Summa diff utan mellansiktar	41,7	25,7	14,0	11,1	28,3
Findelen 0,063-0,25	4,9	2,7	2,7	1,4	5,8

Ett tredje sätt kan vara att beräkna arean under kurvorna för kornstorleksfördelningen och jämföra dessa före och efter. Figur 18 och Figur 19.



Figur 18. Area under kornkurvan före test, efter test och för "målkurvan".

I Figur 19 visas skillnaden i arean under kurvan mellan efter och före test.



Figur 19. Skillnad i area under kornkurvan mellan efter och före test.

5.6 Justering av resultat

Material S som testades i båda HVS-försöken gav inte samma nedbrytningsresultat som i första försöksomgången. Det var också syftet med att använda ett referensmaterial, att kunna fånga upp eventuell skillnad i nedbrytning mellan försöken. För att kunna jämföra resultaten valdes en relativ justering av nedbrytning i försök II. Korrigeringsfaktor har beräknats för skillnaden mellan försöken som:

"arean under kurvan för försök I" / "arean under kurvan för försök II".

Korrigeringsfaktor för areadifferenser blir för:

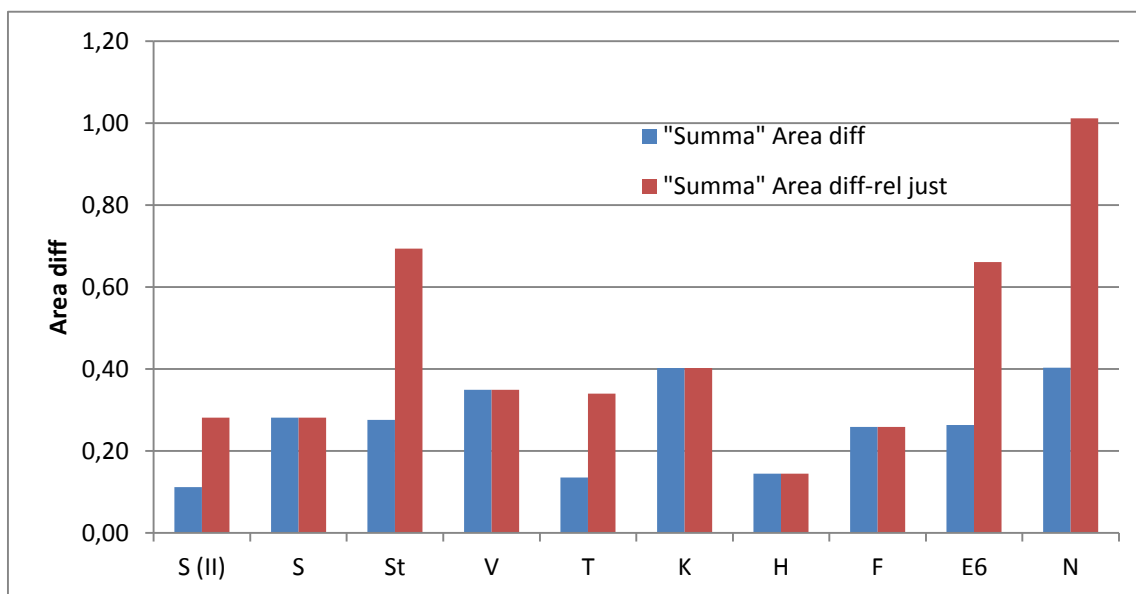
Hela lagertjockleken: 2,5 ($\approx 0,28/0,11$)

Det övre lagret: 6,4 ($\approx 0,21/0,03$)

Det undre lagret: 1,8 ($\approx 0,34/0,19$)

Minst skillnad mellan försöken är det för undre lagret.

Redovisning av justerade resultat görs i Figur 20. Skillnad i area (före och efter) från båda försöken både justerat och faktisk. Figur 20 och i kapitel 6.1.



Figur 20. Skillnad i area (före och efter) från båda försöken både justerat och faktisk. Hela lagertjockleken.

6 Diskussion

Nedan diskuteras de samband mellan spårbildning, mekaniska analyser och nedbrytning som hittats för HVS försök I och II. Trafikverkets kravnivåer diskuteras också.

6.1 Samband mellan nedbrytning och mekaniska egenskaper

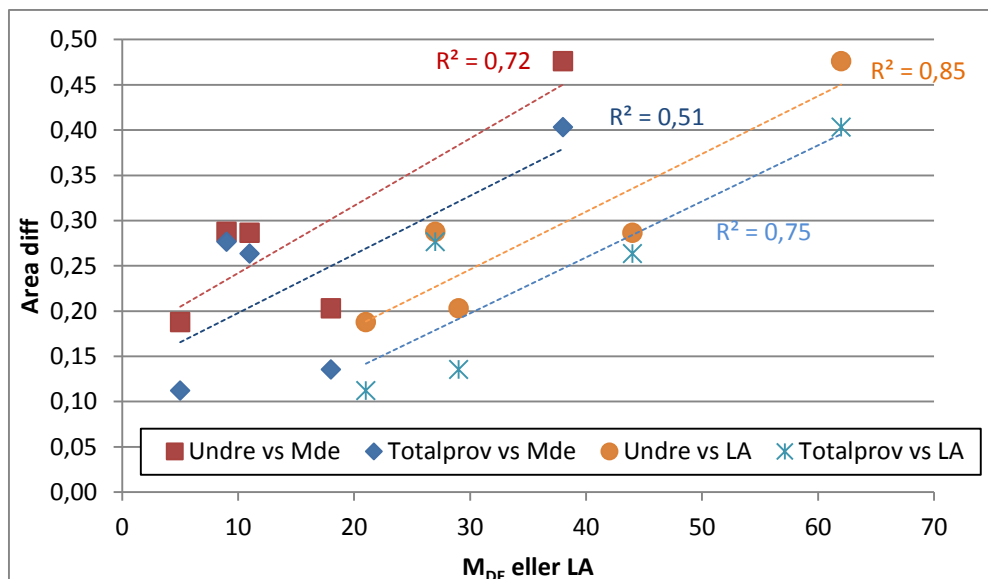
För försök II finns ett klart samband mellan nedbrytning (areadifferens) och mekaniska egenskaper ($LA + M_{DE}$). Mest tydlig är detta för det undre lagret. Se Figur 22. I Figur 21 visas nedbrytning antingen som funktion av micro Deval eller Los Angeles.

För försök I var detta samband mycket svagt. Om försök I och försök II (justerat se 5.6) kombineras får man dock några samband. I Figur 23 visas dessa samband för det undre lagret, där sambandet är starkast. Sambandet är osäkert eftersom material N är ett extremt material.

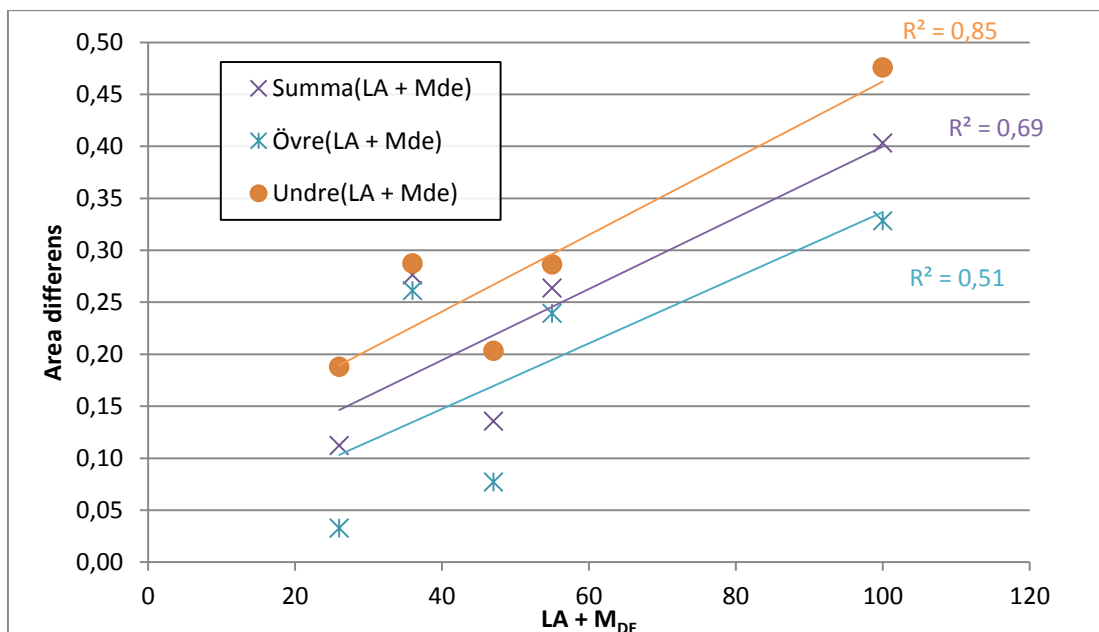
Nedbrytning i *Undre lagret* ger oftast bäst samband. Dock är en del av ”nedbrytningen” även ett tillskott av material från *Övre lagret* pga. omlagring/materialvandring.

För försök I fanns ett starkt samband mellan omlagring (skillnad mellan övre och undre) och spårdjup. Samma samband går det inte se lika tydligt efter försök II.

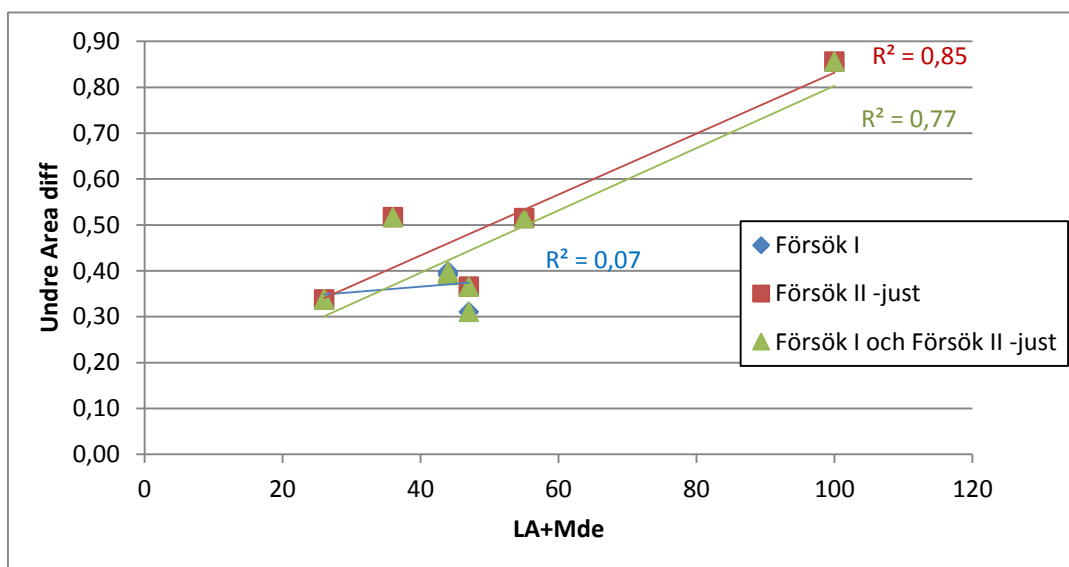
Då material S (som har fungerat som referensmaterial) skiljdes sig åt i nedbrytning mellan försök I och II justerades nedbrytningsresultaten för försök II så att material fick samma nedbrytning. En fundering var om justering skulle göras relativt (multiplicera med en faktor) eller faktisk (addera skillnaden för material S). Då sambandet var starkare för relativ justering valdes den varianten. Man måste då anta att skillnad för material S stämmer för alla material.



Figur 21- Samband mellan nedbrytning och micro Deval eller Los Angeles. Försök II.



Figur 22. Samband mellan nedbrytning och Los Angeles plus micro Deval. Försök II.



Figur 23. Samband mellan nedbrytning och mekaniska analyser för det undre lagret.

6.2 Samband med spårdjupsutveckling

Inget tydligt samband mellan mekaniska analyser av bergkvalité (LA och M_{DE}) och uppkommen spårdjupsutveckling i de obundna lagren kunde hittas.

Mätning av spårdjup visar på omvänt proportionellt samband med ökning av finmaterial (Figur 24, material 0,063/0,25 mm). Det stämmer även med andelen hårda mineral som kvarts och plagioklas enligt petrografisk analys redovisad av Hellman et al (2013).

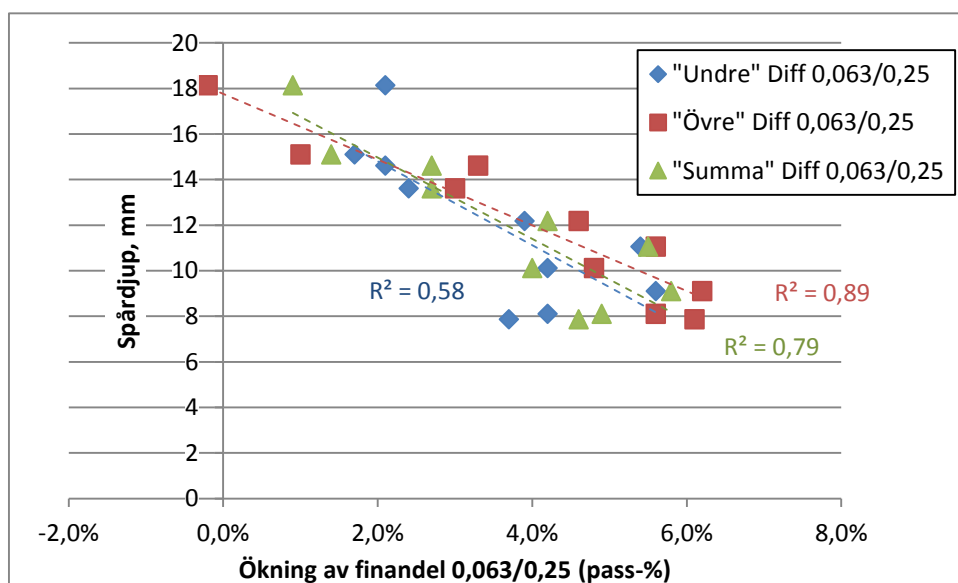
Dessa hårda mineral ger mindre andel finmaterial vid packning och tolkas kräva mer packningsenergi för att packas bra. Troligen kräver den använda kornkurvan att mineralen krossas ner för att optimal packning ska uppnås.

Spårbildningen är omvänt proportionell mot ökning av finandel (0,063/0,25 mm). Även om ökning av finmaterial ökar stabiliteten i torrt tillstånd kan det motsatta uppstå i våta tillstånd. Detta har dock inte provats i denna studie.

Materialen kan delas in i två grupper vad gäller spårdjup. En grupp med två material som har ett spårdjup på ca 9 mm. En andra grupp med tre material med spårdjup på ca 15 mm. *Den första gruppen är materialen som låg i ändarna av testytan. Från försök I hade ett av ändproverna högst spårdjup medan det andra hade minst. Position inom testyta kan ha betydelse men det kan lika gärna vara slump.*

I ett parallellt projekt Hellman et al (2013) där epoxiingjutna in-situprover studerats i mikroskop visas att nedbrytning från vält (packningsarbete) har ett samband med mekaniska analyser (LA och M_{DE}). De visar också att det sannolikt sker omlagring av material när obundna lager trafikeras av tung trafik vilket också visas i denna studie. Figur 14 visar att andelen av fraktion ca 1-16 mm ökar i det övre skiktet av strukturen som en följd av omlagring.

Upplägget (och resurserna) omöjliggjorde provtagning i olika skeenden. Det gäller både i detta projekt som i parallellprojektet, "Försök I".



Figur 24. Spårdjup som funktion av ändring av finandel.

6.3 Trafikverkets kravnivåer för mekaniska analyser

Syftet med detta arbete var att söka samband mellan motstånd mot fragmentering (LA) och nedbrytning från hjullast och ge underlag för att pröva tillämpligheten av kravnivån $LA \leq 40$ för valda bergkrossmaterial. Då resultaten förvisso visade att ballastmaterial med höga LA värden krossas ner i större omfattning än ballastmaterial med lägre värden visade inte resultaten att kravnivåerna är fel. Snarare visar resultaten vikten av att

anpassa kornkurvan till egenskaperna på bergmaterialet. Viss nedkrossning ger i försöken ökad stabilitet och mindre spårdjupsutveckling på de obundna trafikerade lagren. Det är möjligt att vissa ”dåliga” material kan användas med bra resultat genom att justera kornkurvan så att en viss nedkrossning vid packningen (kompakteringen) kan tillåtas. De konstaterade resultaten står delvis i kontrast till nuvarande praxis inom vägbyggnation i Sverige.

Trafikverket ställer idag krav på motstånd mot fragmentering och nötning var för sig, vilket innebär att man riskerar material som ligger nära men under maxgränsen för båda egenskaperna. Det skulle man slippa med ett krav som kombinerar dessa egenskaper och skulle kunna beskrivas ” $LA + M_{DE} \leq X$ ”.

Materialen beskrivna i denna rapport har samtliga material utom ”extremmaterialet N” $LA + M_{DE} \leq 55$ och de har snarlika nedbrytningsresultat, Figur 23.

7 Slutsats

Slutsatsen av dessa två HVS-försök på obundna bärlager är att det till viss del går förklara nedbrytning (förändring av kornstorleksfördelning) med mekaniska egenskaper (som Los Angeles och micro Deval). De korrelationer som styrker sådana samband beskrivna ovan är dock mycket hjälpta av ett extremt material. Hellman et al (2013) visar att nedbrytning och krossning av ballastkornen vid kompaktering har ett samband med de mekaniska analyserna genom att studera mikrostruktur och nedkrossningsgrad. Man kan därför dra slutsatsen att det sker en nedkrossning vid packning med vält och trafik av tunga fordon på exponerade obundna bärlager.

Spårdjupsutvecklingen vid simulering av tung trafik visade sig vara omvänt proportionellt mot ökning av finmaterial (se Figur 24). Detta tyder på att ökning av finmaterial ökar stabiliteten av den relativt öppna kornstorleksfördelningen som användes. Spårdjupsutvecklingen har också ett samband med mineralogi (Hellman et al 2013). Högre andel hårda mineral (kvarts och plagioklas) motverkar produktion av finmaterial och ger i detta fall större spårdjupsutveckling.

Resultaten visar vikten av att anpassa kornkurvan till egenskaperna på bergmaterialet. Viss nedkrossning ger i försöken ökad stabilitet och mindre spårdjupsutveckling på de obundna trafikerade lagren. Det är möjligt att vissa ”dåliga” material kan användas med bra resultat genom att justera kornkurvan så att en viss nedkrossning vid kompakteringen kan tillåtas. Den slutsatsen står delvis i kontrast till nuvarande praxis inom vägbyggnation i Sverige och bör undersökas vidare. Det bör dock påpekas att dessa försök utförts i ”torrt” tillstånd och fukt/vatten är en faktor som måste beaktas i framtida försök.

8 Litteratur/referenser

Metodreferenser

SS-EN 933-1, Ballast - Geometriska egenskaper - Del 1: Bestämning av kornstorleksfördelning – Siktning

SS-EN 933-3, Ballast - Geometriska egenskaper - Del 3: Bestämning av kornform - Flisighetsindex

SS-EN 1097-1, Ballast - Mekaniska och fysikaliska egenskaper - Del 1: Bestämning av nötningsmotstånd (micro-Deval)

SS-EN 1097-2, Ballast - Mekaniska och fysikaliska egenskaper - Del 2: Metoder för bestämning av motstånd mot fragmentering

SS-EN 1097-6, Ballast - Mekaniska och fysikaliska egenskaper - Del 6: Bestämning av korndensitet och vattenabsorption

VVMB 605 - Bestämning av densitet och vattenkvot med isotopmätare. Vägverket Publikation 1993:26

VTI-referenser

Arvidsson H. 2011. Jämförelse mellan Los Angeles-värde och nedbrytning från hjullast, VTI notat 4-2011

Hellman F., Appelquist K., Arvidsson H, Brander L., 2013. Undersökning av mekanisk nedbrytning av obundna material vid tung trafik under byggnation av vägar, VTI rapport 800

Trafikverket

TRVKB 10 Obundna lager. Trafikverket publikation 2011:083.

BILAGA A

Spårbildning

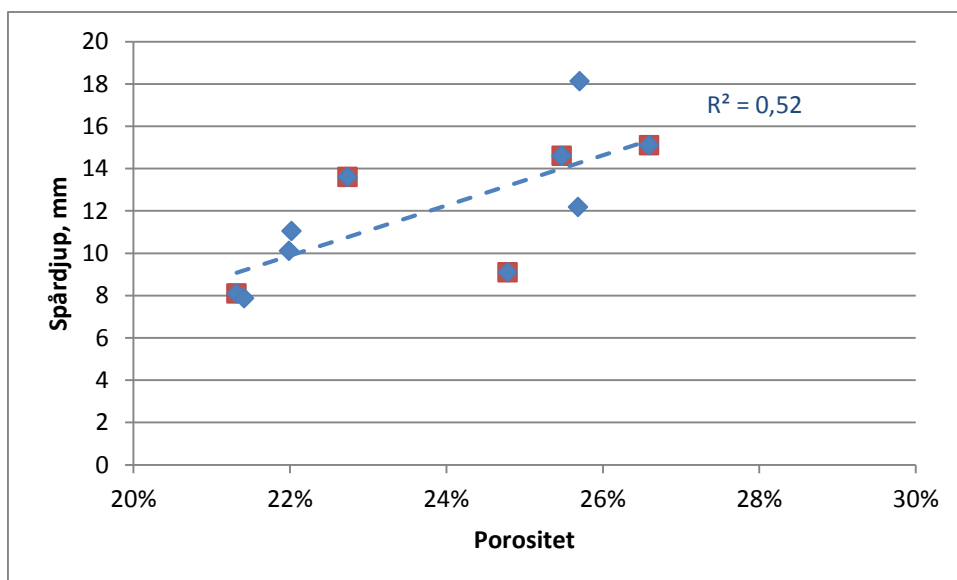
Spårdjupet är beräknat som största skillnaden mellan nollmätningen och fortsatta mätningar. Kontroll har gjorts att sidläget för maxvärdet har varit någorlunda konstant.

Spårdjup efter HVS-test visas som funktion av porositet i figuren nedan.

Porositeten = 100% - torr skrymdensitet efter packning / korndensitet.

Röda kvadrater i "bakgrunden" är värden från försök II ($R^2 = 0,42$).

Mest relevant hade varit att använda packningsgrad istället för porositet. Packningsgrad är skrymdensitet relativt referensdensitet från modifierad Proctor. Packningsegenskaper med Proctor har inte bestämts i dessa projekt.



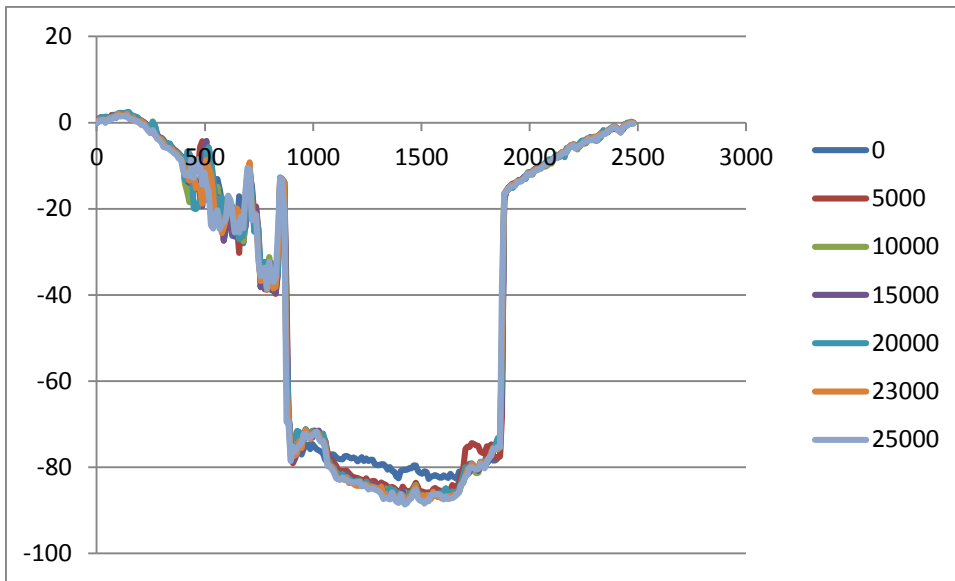
Spårdjup efter HVS-test som funktion av porositet.

På följande sidor redovisas tvärprofiler och spårdjup för varje material och profillinje.

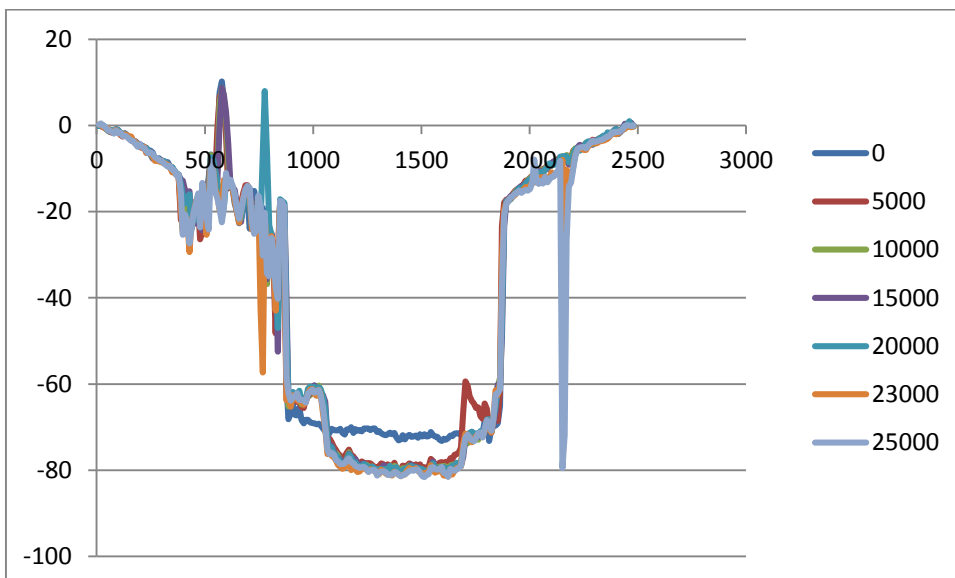
Vid sidan av hjulspåret uppstår valkar. Någon gång mellan 5 000 och 10 000 överfarer uppstod ett fel för HVS:ens sidläge då den uppkomna valken trycktes till. *Se den röda linjen i högra delen av profilerna.*

I diagrammen för tvärprofiler nedan visar X-axeln sidläge (mm) och Y-axeln visar höjdläget (mm). Varje linje motsvarar ett mättillfälle (med antal passager i förklaringen).

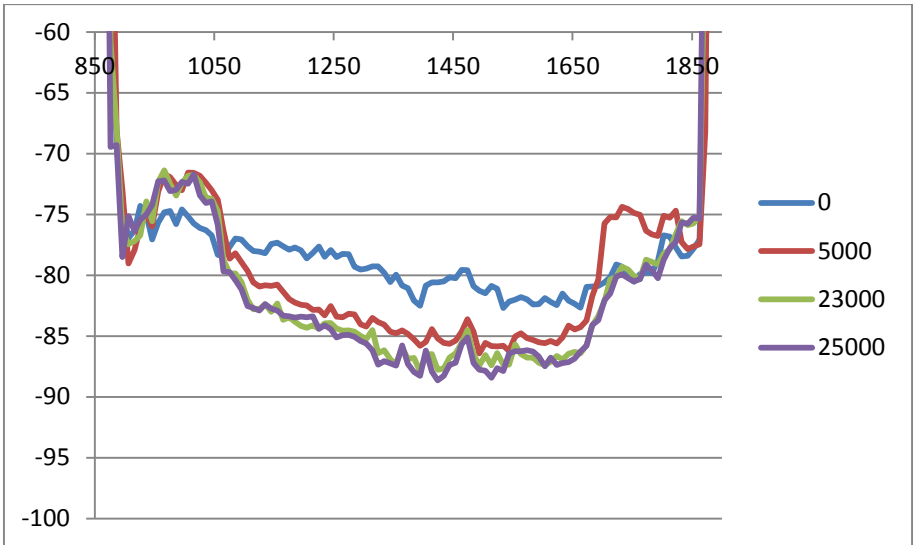
Material St



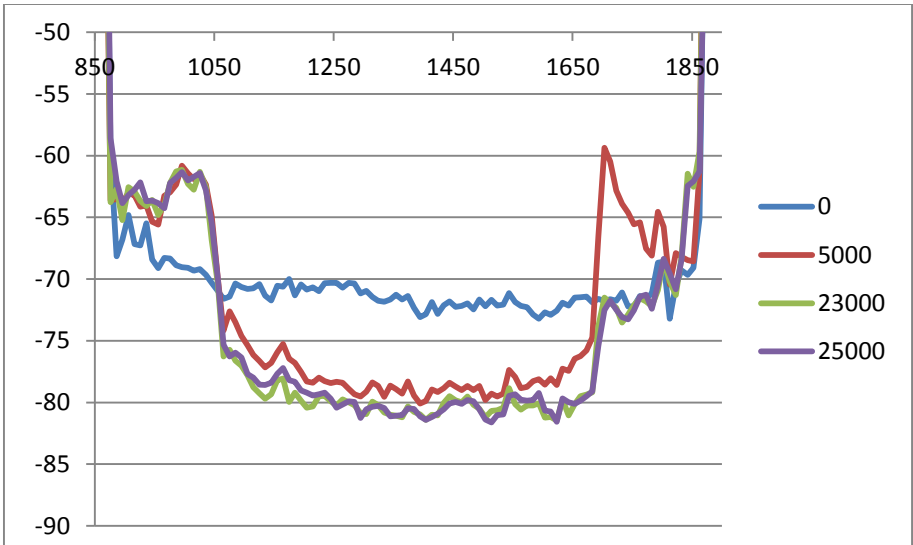
Material St, linje 1_1, hela profilen.



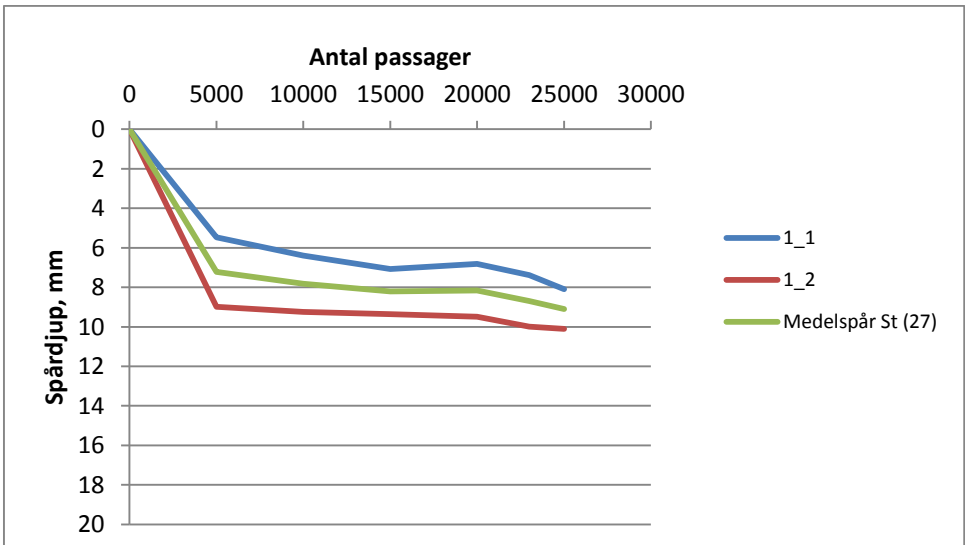
Material St, linje 1_2, hela profilen.



Material St, linje 1_1, in zoomad del sidläge 850-1900.

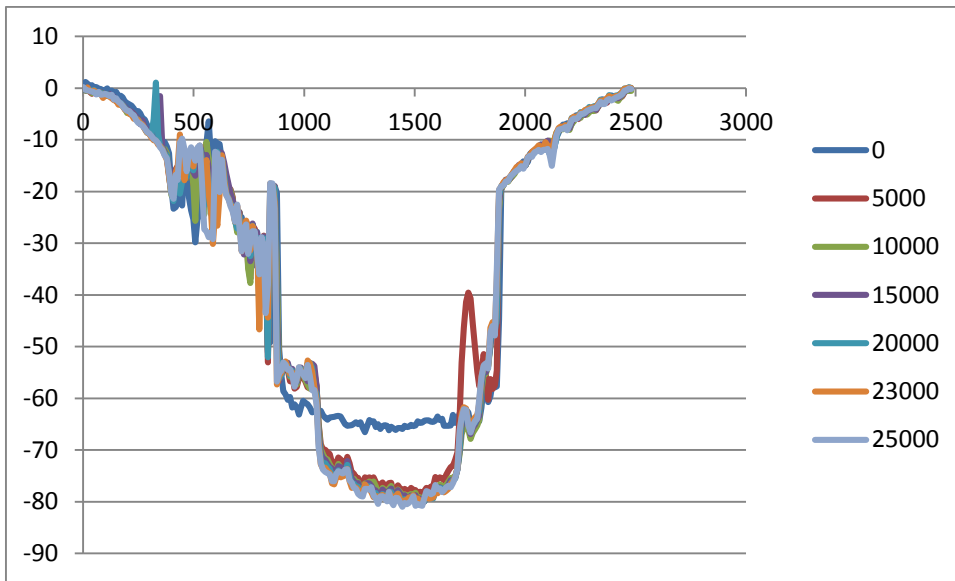


Material St, linje 1_2, in zoomad del sidläge 850-1900.

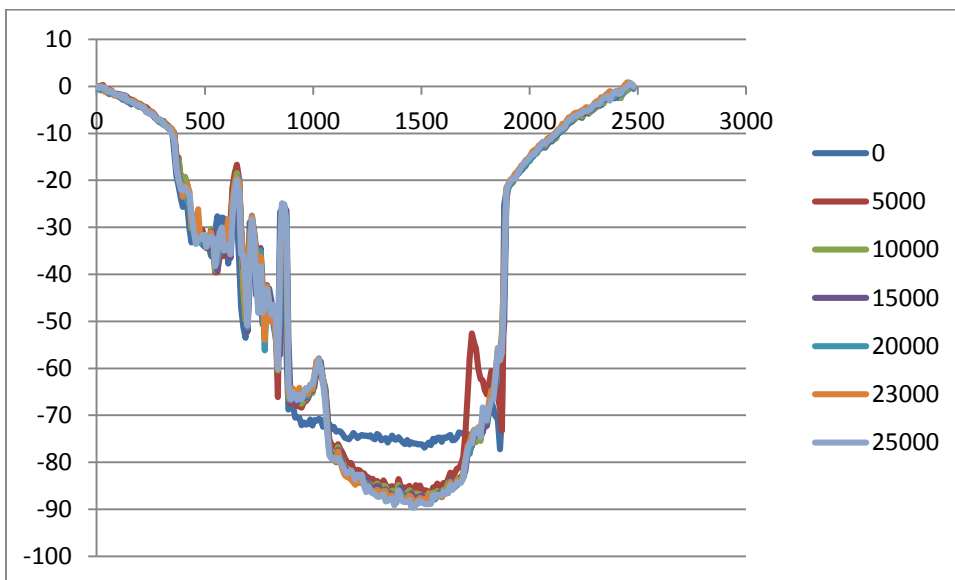


Material St, spår djupsutveckling, enskilda linjer och medelvärde.

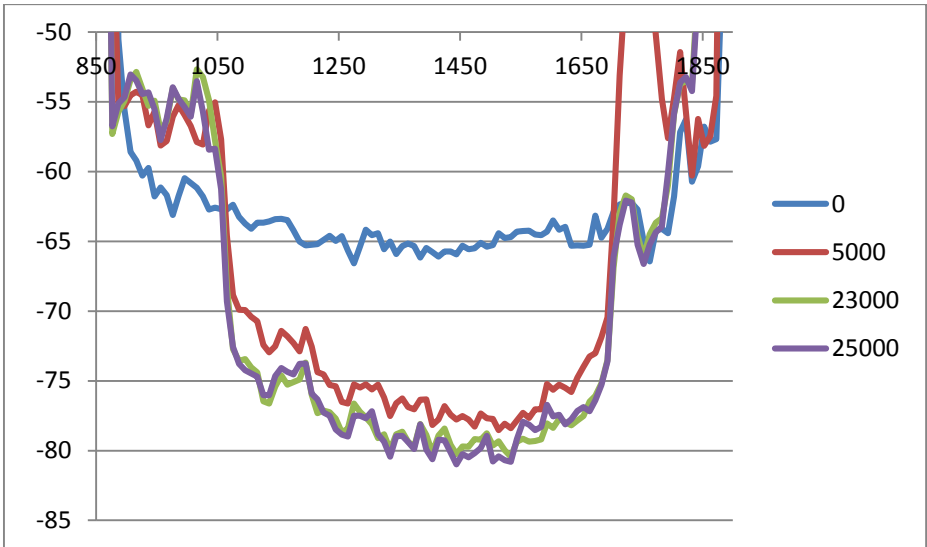
Material S



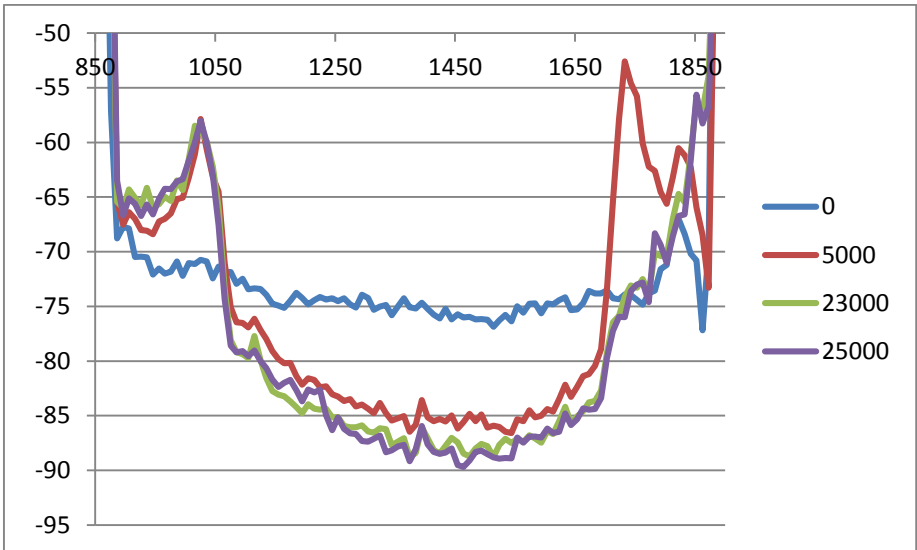
Material S, linje 2_3, hela profilen.



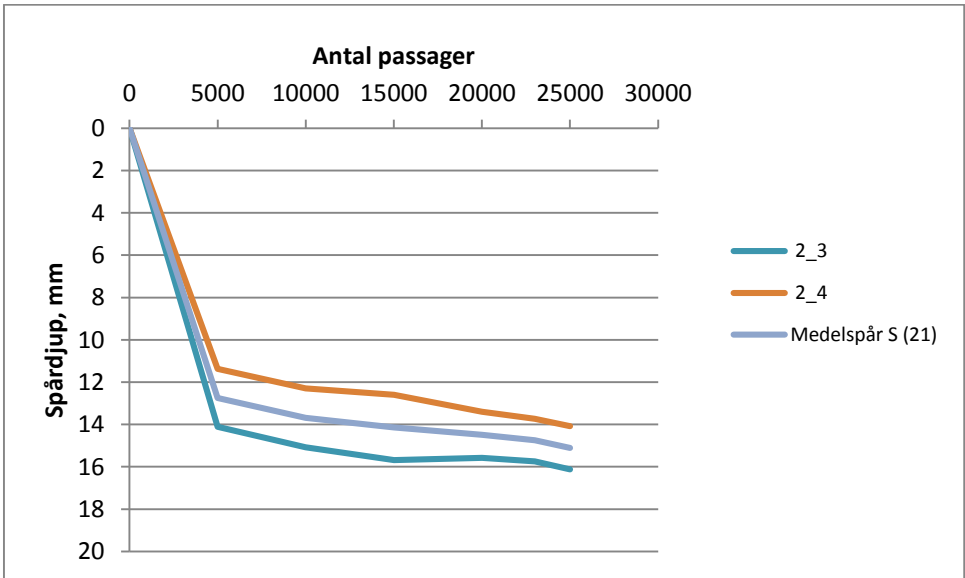
Material S, linje 2_4, hela profilen.



Material S, linje 2_3, in zoomad del sidläge 850-1900.

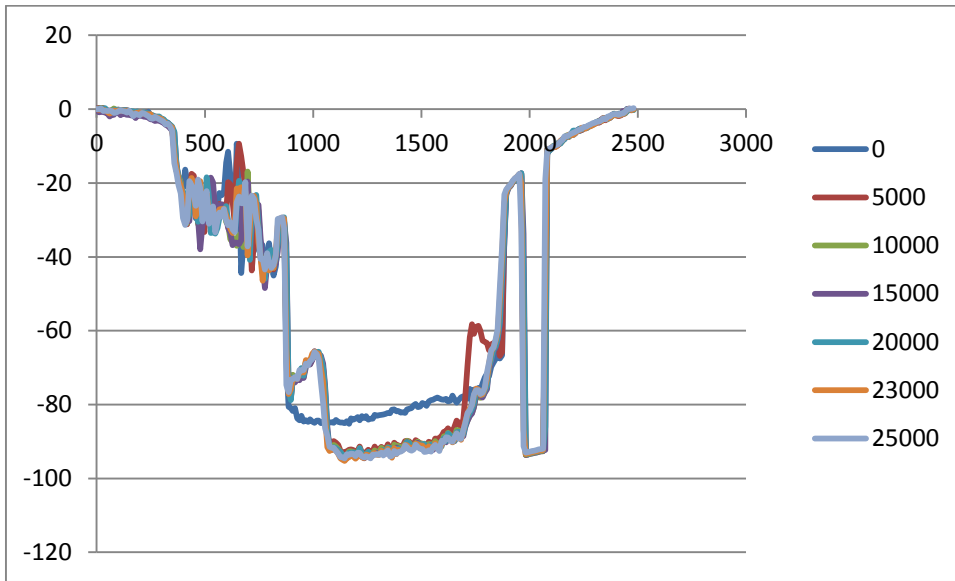


Material S, linje 2_4, in zoomad del sidläge 850-1900.

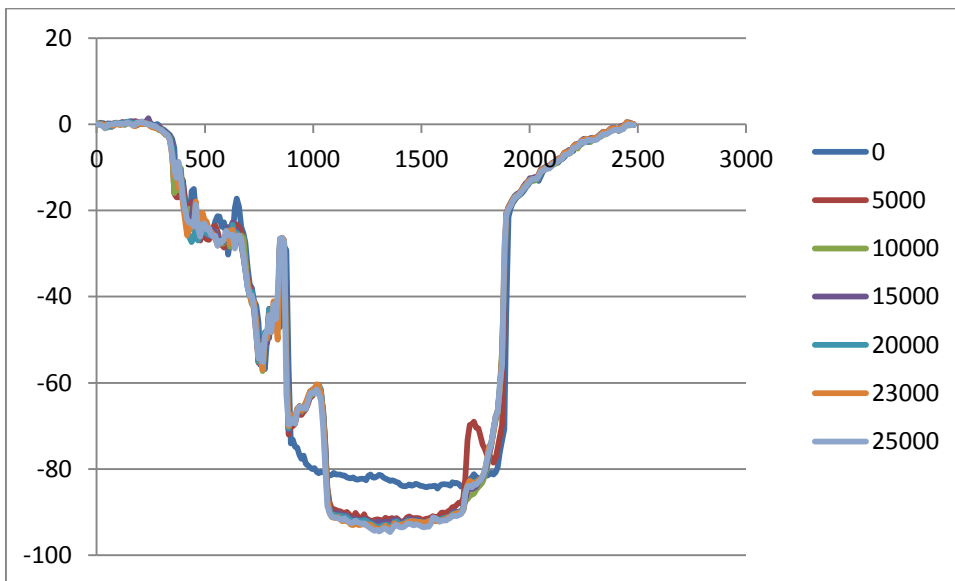


Material S, spårjupsutveckling, enskilda linjer och medelvärde.

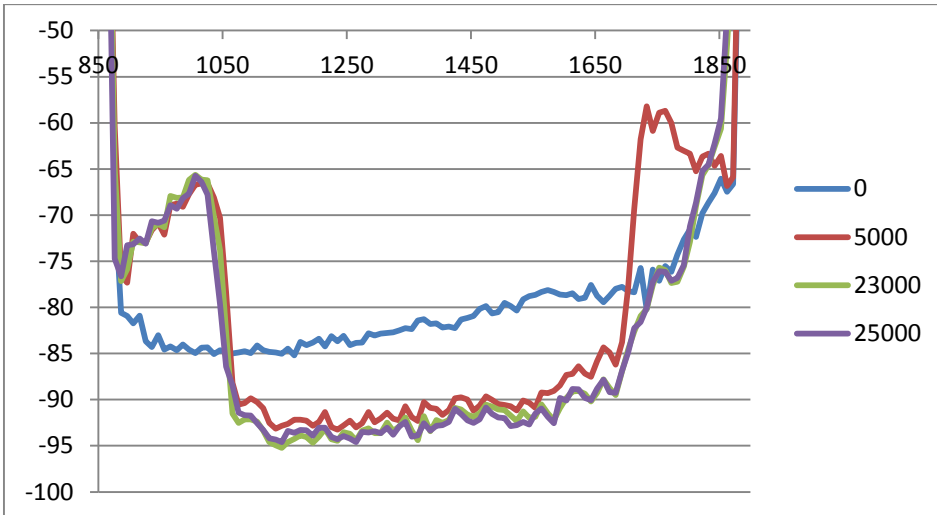
Material T



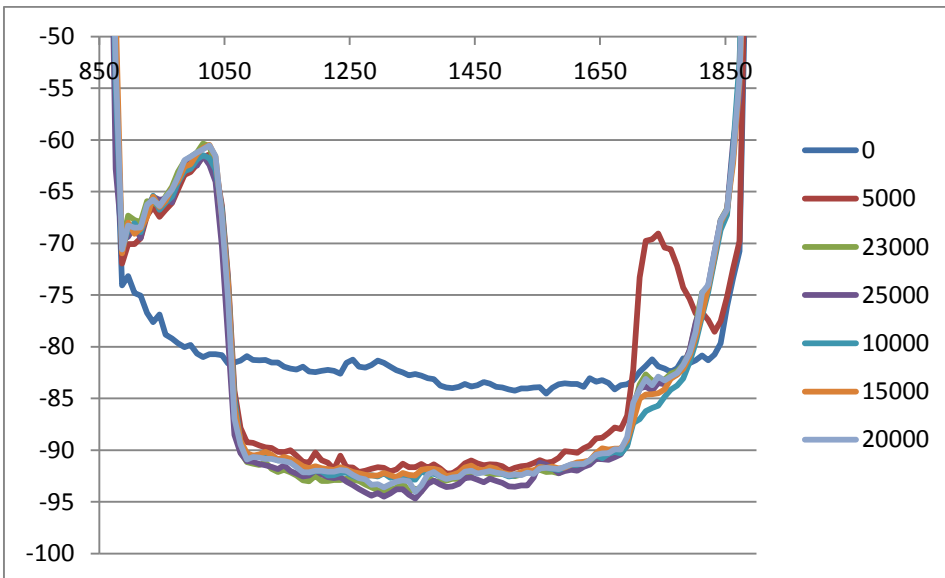
Material T, linje 3_5, hela profilen.



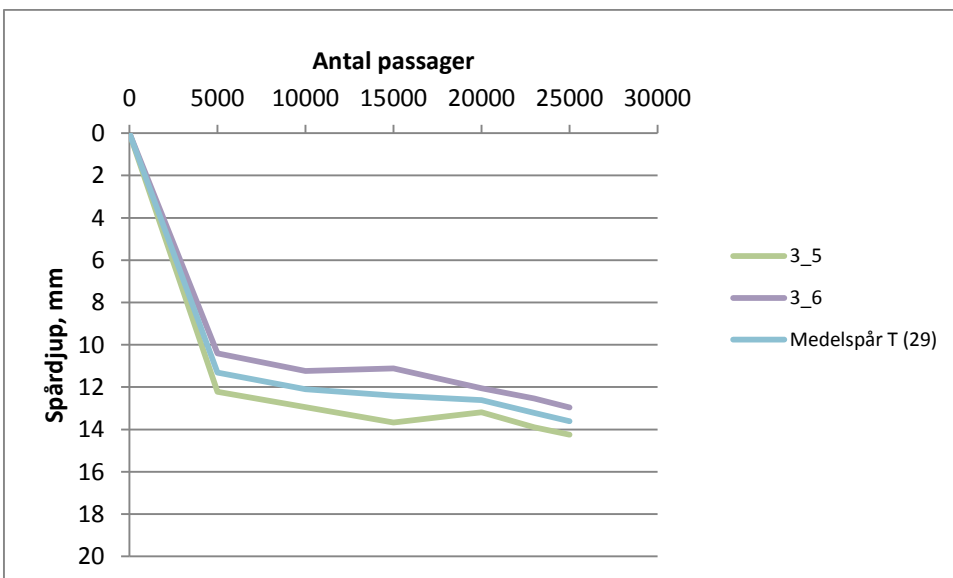
Material T, linje 3_6, hela profilen.



Material T, linje 3_5, in zoomad del sidläge 850-1900.

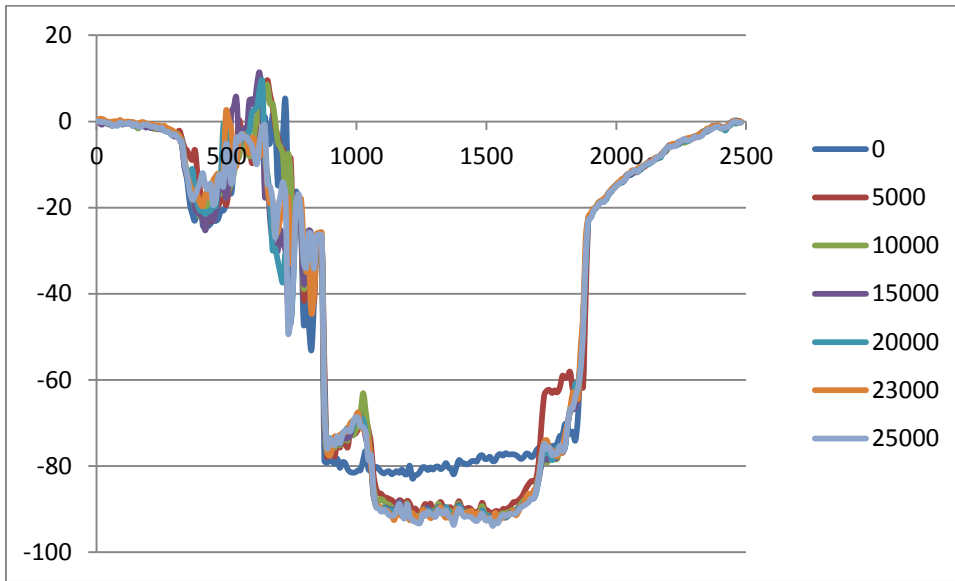


Material T, linje 3_6, in zoomad del sidläge 850-1900.

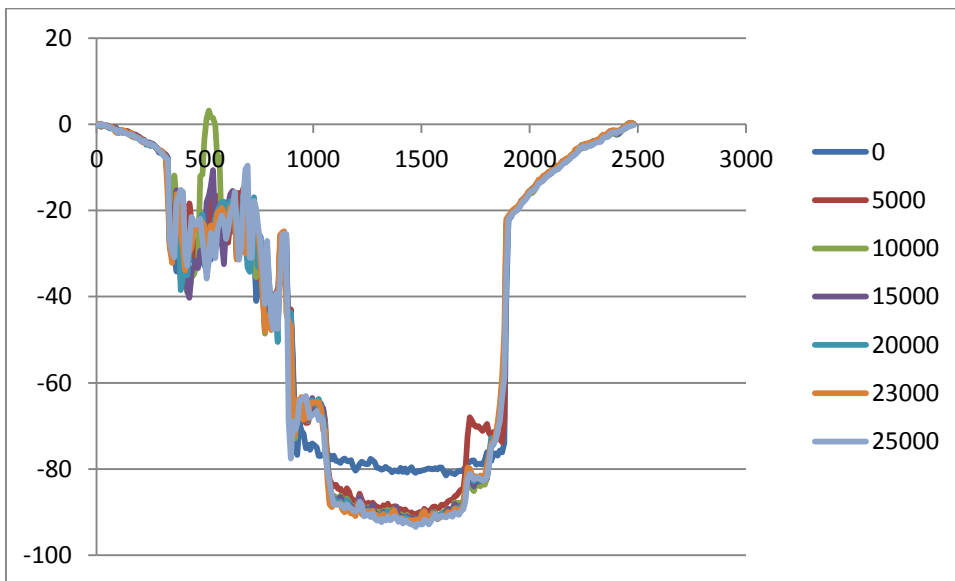


Material T, spår djupsutveckling, enskilda linjer och medelvärde.

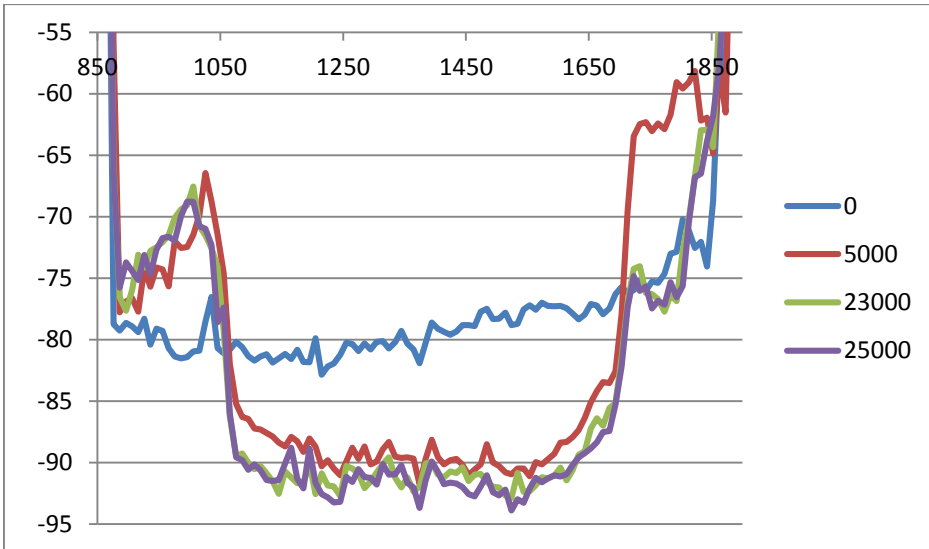
Material E6



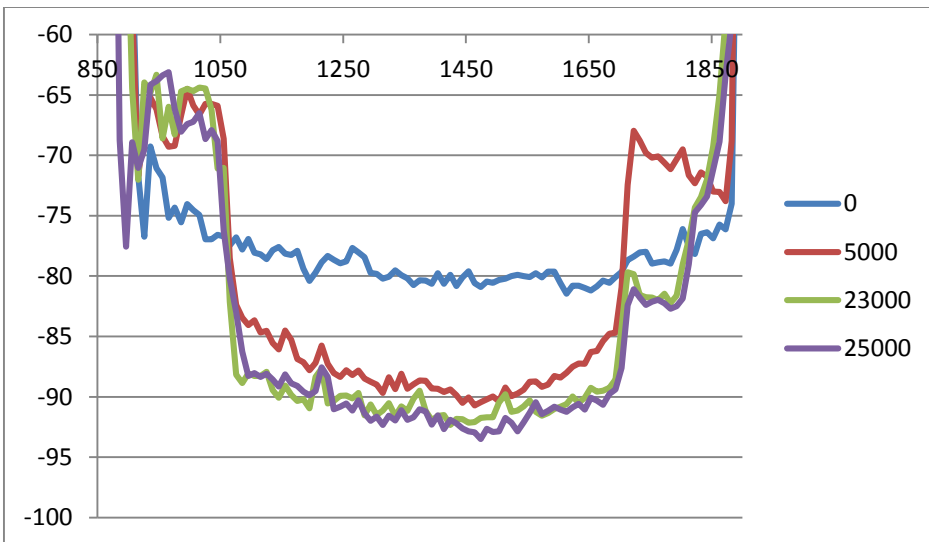
Material E6, linje 4_7, hela profilen.



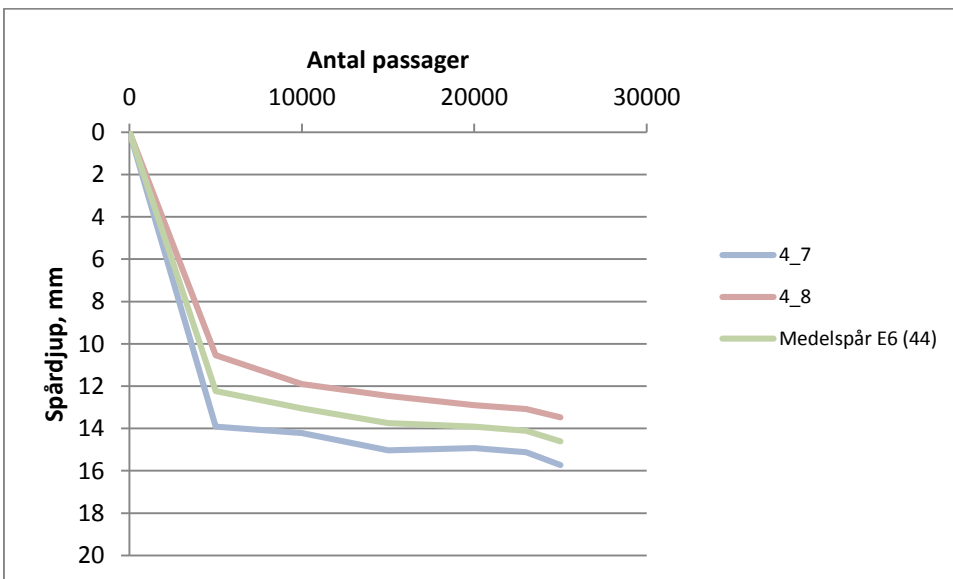
Material E6, linje 4_8, hela profilen.



Material E6, linje 4_7, in zoomad del sidläge 850-1900.

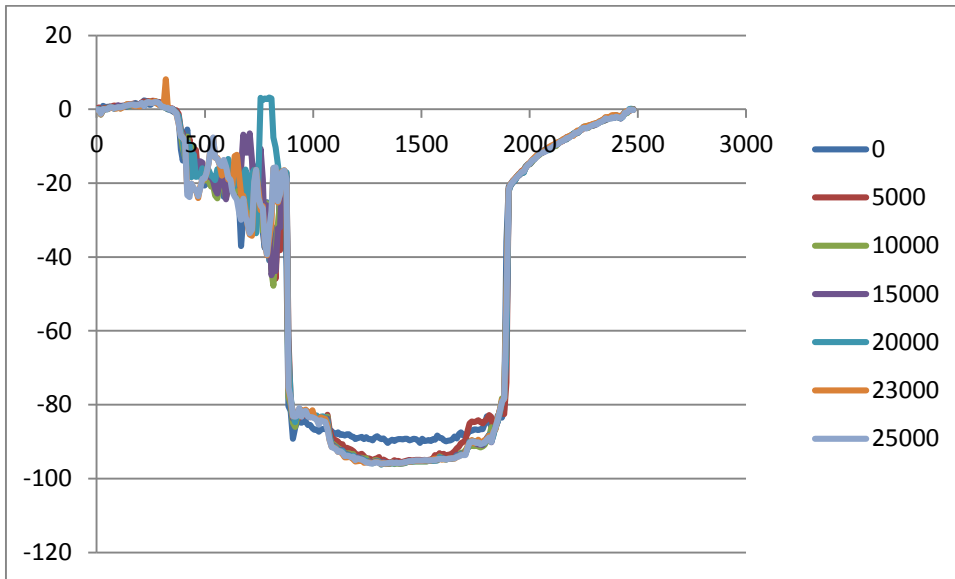


Material E6, linje 4_8, in zoomad del sidläge 850-1900.

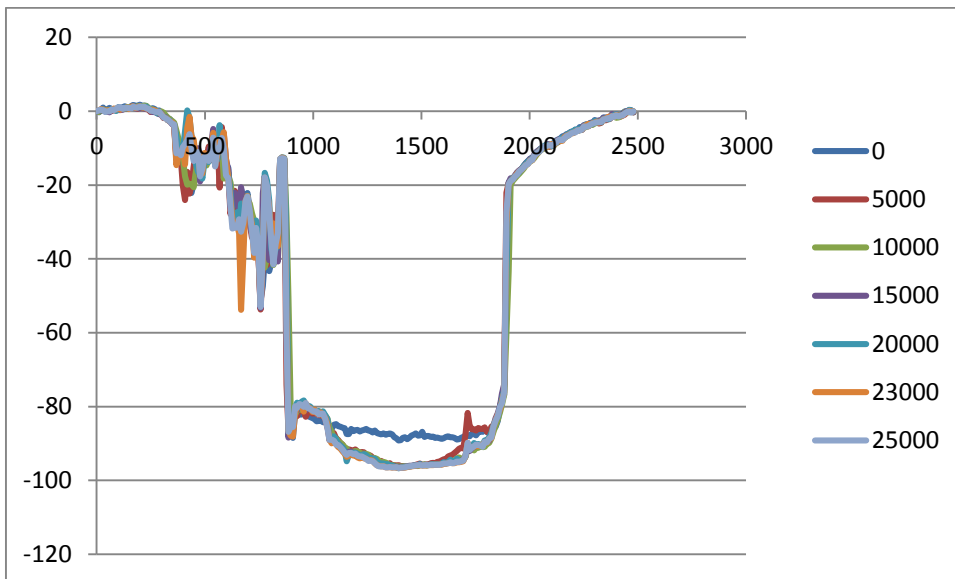


Material E6, spår djuputveckling, enskilda linjer och medelvärde.

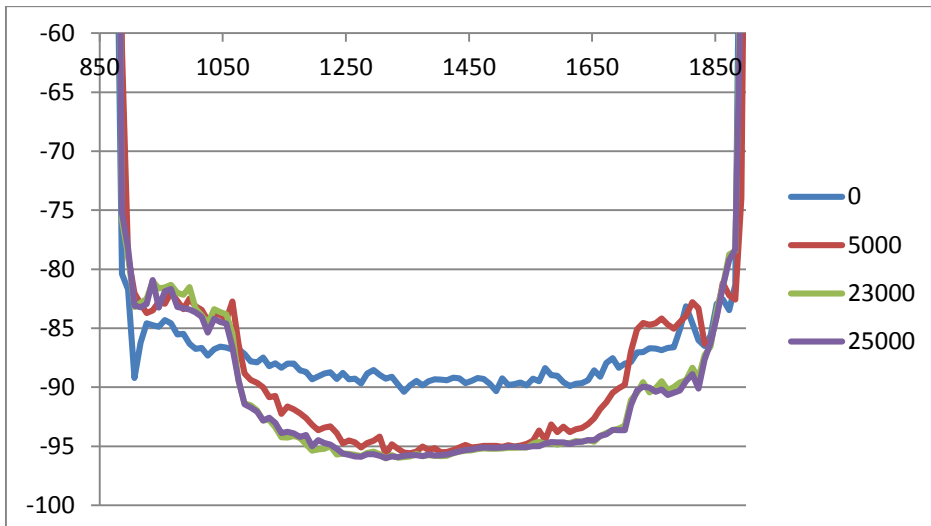
Material N



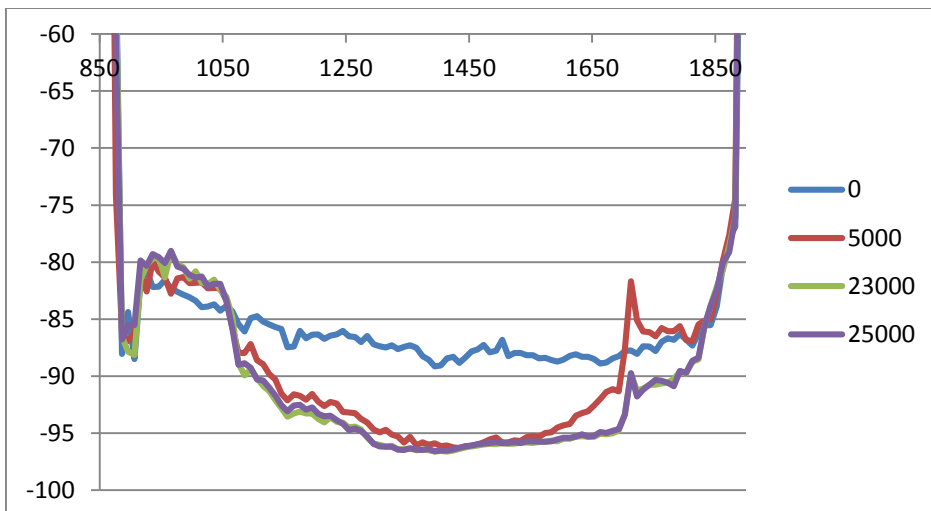
Material N, linje 5_9, hela profilen.



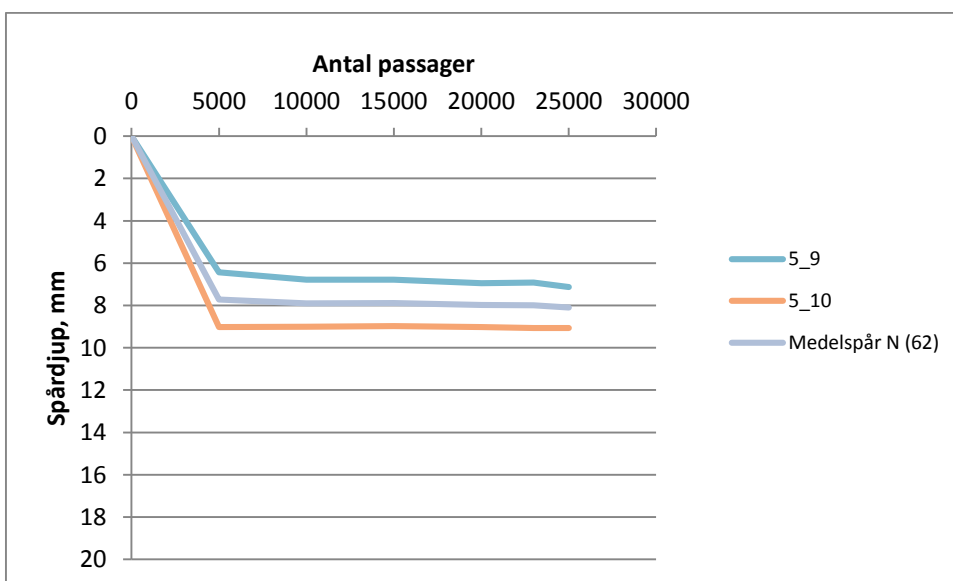
Material N, linje 5_10, hela profilen.



Material N, linje 5_9, in zoomad del sidläge 850-1900.



Material N, linje 5_10, in zoomad del sidläge 850-1900.



Material N, spår djupsutveckling, enskilda linjer och medelvärde.

BILAGA B

Provtagning

Djup/lagertjocklekar har mätts i 3 punkter med en noggrannhet på en halv centimeter. Medelvärdet av de 3 mätningarna redovisas i tjocklekstabellerna nedan.

Lagertjocklekar, medelvärden, provtagning i spåret.

Material	N	E6	T	S	St
Övre skikt	4,7 cm	4,7 cm	5,2 cm	4,7 cm	4,0 cm
Hela tjockleken	8,2 cm	9,0 cm	8,0 cm	8,5 cm	7,3 cm

Lagertjocklekar, medelvärden, provtagning i kanten.

Material	N	E6	T	S	St
Övre skikt -kant	4,0 cm	5,0 cm	5,0 cm	4,8 cm	4,5 cm
Hela tjockleken -kant	7,5 cm	9,0 cm	9,0 cm	8,5 cm	8,5 cm

Provvikter från belastningsspåret för varje delprov (skikt) och sammanlagt redovisas i tabellen nedan.

Provvikter av prover i belastningsspåret.

Material	N	E6	T	S	St
Övre skikt	12,7 kg	11,8 kg	11,9 kg	11,6 kg	8,9 kg
Undre skikt	13,1 kg	12,5 kg	10,3 kg	12,2 kg	12,4 kg
Total provvikt	25,9 kg	24,3 kg	22,2 kg	23,8 kg	21,3 kg

Vikterna nedan består av två prover, ett från varje kant summerat till ett per skikt.

Provvikter av prover i kanten.

Material	N	E6	T	S	St
Övre skikt-kant	5,8 kg	4,8 kg	5,4 kg	5,9 kg	6,4 kg
Undre skikt -kant	5,1 kg	5,4 kg	5,8 kg	5,7 kg	4,7 kg
Total provvikt -kant	10,9 kg	10,1 kg	11,2 kg	11,6 kg	11,1 kg

VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut, är ett oberoende och internationellt framstående forskningsinstitut inom transportsektorn. Huvuduppgiften är att bedriva forskning och utveckling kring infrastruktur, trafik och transporter. Kvalitetssystemet och miljöledningssystemet är ISO-certifierat enligt ISO 9001 respektive 14001. Vissa provningsmetoder är dessutom ackrediterade av Swedac. VTI har omkring 200 medarbetare och finns i Linköping (huvudkontor), Stockholm, Göteborg, Borlänge och Lund.

The Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), is an independent and internationally prominent research institute in the transport sector. Its principal task is to conduct research and development related to infrastructure, traffic and transport. The institute holds the quality management systems certificate ISO 9001 and the environmental management systems certificate ISO 14001. Some of its test methods are also certified by Swedac. VTI has about 200 employees and is located in Linköping (head office), Stockholm, Gothenburg, Borlänge and Lund.



HUVUDKONTOR/HEAD OFFICE
LINKÖPING
POST/MAIL SE-581 95 LINKÖPING
TEL +46(0)13 20 40 00
www.vti.se

BORLÄNGE
POST/MAIL BOX 92
SE-721 29 BORLÄNGE
TEL +46(0)243 446 860
www.vti.se

STOCKHOLM
POST/MAIL BOX 55685
SE-102 15 STOCKHOLM
TEL +46(0)8 555 770 20
www.vti.se

GÖTEBORG
POST/MAIL BOX 8072
SE-402 78 GÖTEBORG
TEL +46(0)31 750 26 00
www.vti.se

LUND
POST/MAIL Medicon Village
SE-223 81 LUND
TEL +46(0)46 540 75 00
www.vti.se