

# Askvägar i skogsbruket: metod-effekt-kostnad

Ash-reinforcement on forestry roads: Methods, results and costs



FOTO: SVERKER JOHANSSON/BITZER

# Summary

The use of fly ash from incineration of forest fuel as reinforcement material in gravel roads has been tested in a number of trials. This project compares four different methods of mixing the ash with gravel when building ash-reinforced roads in terms of technical results and cost of construction. The methods were assessed on two test roads built west of Timrå. One was an old road that needed upgrading, while the other was newly built.

In all methods, 20–25 percent fly ash from Ortviken paper mill was mixed with crushed rock material (0–32 mm) and water. The difference was in how the components were mixed. The following methods were tested:

- Mixing on the road with a road grader
- Mixing on the road with a road milling machine
- Mixing at the storage site with a mixing bucket
- Mixing at the quarry in a crusher

After the material had been placed on the test roads, the roads were watered and compacted with a vibrating roller.

After 30 days, the bearing capacity (CBR) of the roads was measured with a dynamic cone penetrometer and a heavy falling weight deflectometer. The results varied from a moderate increase in bearing capacity (average CBR value 31 where the material had been mixed with the road grader) to a distinct increase (CBR value 70 for mixing in a crusher), compared with a traditionally built road (CBR value 25). Results for the other mixing methods were between these extremes (CBR value 47 for the mixing bucket and 58 for the milling machine). However, the bearing capacity varied greatly between different measuring points, especially for the mixing bucket and the milling machine. The association between surface module and bearing capacity is not as clear, probably because of the influence from varied subbase material.

Using ash to strengthen roads relies upon efficient logistics to ensure acceptable machine utilisation. Furthermore, the watering/packing stage is critical in terms of time for the hardening process of the ash.

The cost of building an ash-reinforced base course was investigated for a road with rock and water supplies within a couple of kilometres. According to the work processes proposed for each mixing method, the cost of the method where material is mixed by a crusher is 67 percent higher than when ordinary gravel is used. The method involving the mixing bucket is 58 percent more expensive, and the grader 39 percent. For the relatively rare milling machine, the cost is uncertain, because of the difficulty of presenting a representative machine cost.

A comparison between the different methods must also consider the work environment. Dust generation proved to be a major problem, particularly with the crushed mixture. The strongly basic properties of the ash makes it irritating in contact with skin, eyes and respiratory system, so ensuring the quality of the work environment is particularly important.



# Förord

Den här rapporten baseras på ett anläggningsprojekt som utfördes i SCA:s regi under sommaren och hösten 2018. Anläggning av försöksvägar är mycket kostsamt om det ska göras i en skala som är tillräckligt stor för att bedriva anläggningsteknisk forskning. Vi som arbetat med projektet från Skogforsk vill rikta ett varmt tack till SCA, som bekostat projektets försöksvägar. Vi vill också särskilt tacka alla duktiga maskinförare för deras väl utförda arbete och stora tålamod. Speciellt vill vi också uppmärksamma Tomas Johanssons entusiasm och engagemang genom hela projektet.

Vi vill även rikta ett tack till Energiforsk för att de finansierat en långtidsuppföljning av miljöeffekterna av en skogsbilväg, byggd på samma sätt som beskrivs i denna rapport. Miljökonsekvenserna av skogsbilvägar som stabiliserats med flygaska kommer att presenteras i en separat rapport i Energiforsks rapportserie.

Delaktiga i arbetet har från Skogforsks sida varit Mikael Bergqvist, Hagos Lundström, Linnea Hansson och Daniel Noreland.

Uppsala i oktober 2019

Daniel Noreland

# Innehåll

Summary.....	2
Förord .....	3
Sammanfattning .....	6
Rapportens struktur .....	7
Bakgrund .....	7
Material och Metoder .....	9
Testvägar.....	9
Testväg 1, Åsjövägen .....	9
Testväg 2, Tjärdalsbergsvägen.....	11
Bergmaterial .....	12
Fjäl.....	12
Västerlo .....	13
Aska.....	13
Recept på askblandning.....	14
Bärighetsmätningar m.m.....	14
California Bearing Ratio, CBR.....	14
Dynamisk konpenetrometer, DCP.....	15
Fallvikt.....	16
Mätning av askblandningens tjocklek.....	17
Byggmetoder .....	18
Infräsning (metod 1) .....	18
Inblandning av aska vid krossning av bärlager (metod 2).....	19
Inblandning med hyvel (metod 3).....	20
Blandning med blandningsskopa (metod 4).....	21
Lagring, Täckning .....	22
Tillståndsprocess .....	24
Miljötillstånd.....	24
Provtagning av dikesvatten i fält vid väg.....	25
Arbetsmiljö aska/trafik.....	27
Maskinslitage/rengöring .....	27
Resultat och diskussion.....	28
Teststräckornas egenskaper .....	28
Referenssträcka (testväg 1).....	29
Metod 1: infräsning (testväg 1, teststräcka 1).....	30
Metod 2: krossverksblandning (testväg 1, teststräcka 2).....	31
Metod 3: hyvelblandning (testväg 1 och 2, sträcka 3).....	32
Metod 4: tillredning med blandningsskopa (testväg 2, sträcka 1).....	33
Samband mellan CBR-värden och elasticitetsmodul .....	33
Arbetsprocessernas betydelse för hållfastheten.....	34

Prestationsmodeller för anläggning eller upprustning av vägar med aska.....	37
Rekommenderad arbetsgång.....	37
Några användbara råd .....	38
Utläggning med lastbil.....	39
Lastcykler .....	41
Möten mellan lastfordon .....	42
Lastfordonens utförelsekapacitet i relation till tillredningskapaciteten .....	44
Lastfordonens kapacitet i relation till lastkapaciteten vid tåkten .....	44
Systemprestation för utläggningsmomentet.....	44
Om inverkan av avstånd mellan vändmöjligheter .....	45
Bevattning, hyvling och packning .....	45
En fallstudie: Tidsåtgång för utforsling av överbyggnadsmaterial samt vattning, hyvling och kompaktering av en 1050 m lång sträcka .....	50
Objektet.....	50
Krossverk.....	50
Blandningsskopa.....	50
Utforsling av material .....	51
Vattning och hyvling.....	51
Kompaktering med vält .....	52
Kostnads kalkylering .....	53
Om inverkan av avståndet till vattentåkten och antalet vattenbilar.....	56
Jämförelse av de olika blandningstyperna enligt STP-modellen .....	56
Slutsatser om askförstärkningens tekniska och ekonomiska resultat .....	59
Referenser.....	61
Bilaga 1. Tidsstudier .....	62
Tidsstudie krossverk.....	62
Tidsstudie blandningsskopa .....	65
Tidsstudie fräs.....	66
Tidsstudie hyvel .....	67
Tidsstudie lastbilar .....	69
Tidsstudie vält.....	71
Tidsstudie flisbil.....	73
Tidsstudie vattenbil .....	74
Bilaga 2. Byggdagbok .....	76

# Sammanfattning

Flygaska från förbränning av skogsbränslen har tidigare testats som förstärkningsmaterial i grusvägar i ett antal försök. Detta projekt jämför fyra olika metoder för att bygga askförstärkta bärlager med avseende på tekniskt resultat och kostnad för anläggningsarbetet. Metoderna testades på två försöksvägar väster om Timrå. Den ena vägen var en gammal väg som behövde rustas upp medan den andra nybröts.

I alla metoder blandades 20–25 procent flygaska från Ortvikens pappersbruk med stenkrossmaterial (0–32 mm) och vatten. Det som skilde metoderna åt var blandningstekniken.

Följande metoder testades:

- Blandning på väg med väghyvel
- Blandning på väg med vägfräs
- Blandning med blandningsskopa vid lagerplats
- Blandning i stenkrossverk vid bergtäkt

Efter att materialet lagts ut på försöksvägarna bevattnades det och kompakterades med vibrovält. Efter 30 dagar mättes dess hårdhet (CBR) med dynamisk konpenetrometer samt tung fallviktsmätning. Det visades då att resultaten varierade från en måttlig förhöjning av hållfastheten (genomsnittligt CBR-värde 31 för hyvelblandning) till en markant höjning (CBR-värde 70 för blandning i krossverk), jämfört med en traditionellt anlagd väg (CBR-värde 25). De andra metoderna placerade sig däremellan (CBR-värde 47 för blandningsskopa och 58 för fräsblandning). Dock var variationen mellan olika mätpunkter stor, speciellt för blandningsskopan och fräsblandningen. Sambandet mellan ytmodul och hårdhet är inte lika tydligt, sannolikt beroende på stor inverkan från det kraftigt varierande terrassmaterialet.

Askförstärkningsprojektets ekonomi är beroende av en effektiv logistik för acceptabelt maskinutnyttjande. Dessutom är vattnings-/packningsmomentet tidskritiskt för askans härdningsförlopp. I denna studie har anläggningskostnaden för ett askförstärkt bärlager undersökts för en väg med tillgång till berg- och vattentäkt inom ett par kilometer. Enligt de arbetsprocesser som förslås för de respektive metoderna är byggkostnaderna för metoden med krossverksblandning 67 procent dyrare än om vanligt grus används. Metoderna med blandningsskopa och hyvel är 58 respektive 39 procent dyrare. För den förhållandevis sällsynta fräsen är kostnaden osäker beroende på svårighet att presentera en representativ maskinkostnad.

En jämförelse av de olika metoderna bör även ta hänsyn till arbetsmiljön. Stora problem med damning konstaterades, speciellt vid krossverksblandningen. Askans starkt basiska egenskaper gör den irriterande för hud, ögon och andningsvägar, vilket gör arbetsmiljöarbetet extra viktigt.

# Rapportens struktur

Rapporten inleds med en beskrivning av projektets bakgrund och tidigare gjorda försök med askförstärkning. Därefter redovisas detaljerat egenskapen hos projektets försöksvägar, använt material, mätmetoder samt de byggmetoder som prövats. De olika metodernas byggförlopp och gjorda iakttagelser beskrivs med en detaljnivå som ska göra det möjligt att reproducera projektets försök. Syftet så långt är att presentera underlag för de hållfasthetsmekaniska och arbetsmetodsmässiga slutsatser som sedan redovisas. De rekommendationer som följer angående arbetsgång samt de därtill hänförliga prestationsmodellerna baseras på tidsstudier och andra observationer som gjordes under byggandets olika moment. Således har de föreslagna arbetsgångarna inte prövats på systemnivå under projektet, eftersom det senare utgjorde försöksbänk för olika metoder och operationer. Resultatkapitlet avslutas med en fallstudie, då tid och kostnad beräknas för anläggning av en 1 km lång exemplarväg enligt de olika byggmetoderna och föreslagna arbetsgångar. Rapportens sista del presenterar några allmänna slutsatser och rekommendationer riktade till väghållare som överväger att använda flygaska som förstärkningsmaterial i skogsbilvägar.

## Bakgrund

Grusvägar drabbas ofta av skador i samband med tjällossning eller intensivt regn. Utöver rena skador sker dessutom ett fortgående slitage på vägarna genom trafikering. Avgörande för en vägs bärighet är hållfastheten och styvheten hos bärlagret. Bärlagrets funktion är att fördela hjulkrafterna från fordonen över den mekaniskt svagare terrassunderbyggnaden. För att undvika skador och minska slitaget på vägkonstruktionen är det avgörande att bärlagret håller tillräckligt hög kvalitet under alla årstider som vägen används. De pågående klimatförändringarna antas medföra mer nederbörd under vissa delar av året, mer svåröverskådlig tjälbildning och i vissa fall ökat antal tjällossningar per säsong. Dessa förhållanden, i kombination med ökande krav från skogsbruket att kunna avverka och transportera rundvirke och skogsbränsle under hela året, gör att kraven på skogsbilvägnätets bärighet och tillgänglighet kan förväntas öka i framtiden.

Aska från förbränningsanläggningar har tidigare föreslagits som förstärkningsmaterial i skogsbilvägar (Munde m.fl. 2006) och flygaska från biobränsleförbränning har många egenskaper som påminner om portlandcement. Bärighetshöjande effekter har kunnat konstateras på testvägar i ett antal studier och miljöeffekterna har varit små (Vestin m.fl. 2016, Bergman, 2011, Lahtinen, 2001, Kaakkurivaara m.fl. 2016). Något som däremot endast i liten grad studerats i Sverige är de ekonomiska förutsättningarna för askförstärkning mot bakgrund av det tekniska resultatet och praktiska utförandet av förstärkningsåtgärden.

Tidigare studier har visat på goda resultat med inblandning av aska i bärlagret med vägfräs (Mácsik m.fl. 2009, Born, 2014). Då vägfräsar inte är vanligt förekommande vid anläggning och underhåll av skogsbilvägar är det intressant att undersöka alternativa metoder för askinblandning. Dessa metoder nyttjar utrustning som entreprenadföretag normalt har tillgång till, i form av hjullastare, krossverk och väghyvel. För att askinblandning ska vara intressant som förstärkningsmedel krävs att den erhållna höjningen av standarden ekonomiskt uppväger kostnadsökningen för åtgärden.

En ökad hållfasthet i överbyggnadsmaterialet kan tas ut i form av minskad materialåtgång, ökad bärighet på vägen eller längre underhållsintervall. De ökade kostnaderna vid nyttjande av flygaska för vägförstärkning hänförs främst till längre tidsåtgång för ingående moment och en ökad logistisk komplexitet. Kostnader för asktransport tillkommer också. Eventuellt kan även utbildningsinsatser för anläggningspersonal krävas. Ett krav för att använda aska i vägkonstruktioner är att en miljöundersökning görs och även läckaget av näringsämnen och tungmetaller från vägöverbyggnaden bör studeras.

I den här studien har Skogforsk tillsammans med SCA gjort praktiska försök med askinblandning i skogsbilvägars bär- och slitlager. Syftet med projektet var att undersöka de praktiska förutsättningarna för att använda flygaska som förstärkningsmaterial i skogsbilvägar. Utöver att undersöka kostnad och effekt syftade studien till att ta fram rationella arbetsmetoder för förstärkningsåtgärder. Fyra olika metoder för tillredning och utläggning av askförstärkta bärlager undersöktes med avseende på tekniska egenskaper (bärighet), miljöaspekter och ekonomi:

1. infräsning med vägfräs
2. tillredning i krossverk
3. blandning på väg med väghyvel
4. tillredning i blandningsskopa

Resultaten jämfördes med en referenssträcka som uppgraderats på traditionellt sätt. Vägöverbyggnadens mekaniska egenskaper undersöktes med både konpenetrometermätningar och fallviktsmätningar och ekonomin studerades genom tidsstudier av anläggningsåtgärderna. Dessutom togs vattenprover i vägdikena för att undersöka om byggandet av askvägarna hade någon omedelbar påverkan på vattenkemin.

Resultaten från studien presenteras i denna rapport med praktiska erfarenheter och rekommendationer om arbetsmetodik. Främst frågor kring materialåtgång och bärighet berörs, men frågeställningar kring underhållsintervall bör studeras i fortsatta studier.



# Material och Metoder

## TESTVÄGAR

Studien utfördes på två testvägar, Åsjövägen (testväg 1) och Tjärdalsbergsvägen (testväg 2) som i sin tur delades in i tre teststräckor och en referenssträcka (Figur 1 och 3).

### Testväg 1, Åsjövägen

Testväg 1, Åsjövägen, ligger i Timrå kommun väster om byn Fjäl. Den valdes ut till försöket då den låg nära industrin och SCA krossprodukter hade en bergtäkt i anslutning som var lämplig för lagring av aska (Figur 1). Vägen hade en välbyggd terrass men underhållet var eftersatt. Överbyggnaden bestod av ett sorterat naturmaterial och vägens tillgänglighetsklass var C (trafikerbar under sommar och vinter). Bärigheten på vägen behövde höjas till tillgänglighetsklass A (trafikerbar året runt), då SCA planerade att gallra och slutavverka i anslutning till vägen.

Ett antal trummor byttes ut längs Åsjövägen innan försöken startades. Vägdikena rensades och slamfällor anlades för att förhindra att erosion och urlakning skulle ske till vattendragen. Vägen delades in i fyra försöksträckor enligt följande:

- Teststräcka 1, 1100 m (metod 1, infräsning)
- Referenssträcka, 300 m (konventionell)
- Teststräcka 2, 1050 m (metod 2, ask-grusblandning från krossverk)
- Teststräcka 3, 900 m (metod 3, väghyvel)

Mätpunkter placerades i hjulspåren på sträckorna med 50 m avstånd, både på höger och vänster sida. Dessa punkter användes igenom hela projektet för att mäta bärighet och tjocklek på de olika väglagren.

### Teststräcka 1, 1100 m

Sträcka 1 började ca 1 km in efter vägen och bestod av två delar. Del 1 innefattade 700 m längs Åsjövägen (huvudvägen) och 400 m längs Orrsjöbäcksvägen (Figur 1). Åsjövägen är byggd med en relativt hög terrass och en god geometrisk standard, medan Orrsjöbäcksvägen har en enklare byggd terrass med sämre geometrisk standard. Dessutom var jorddjupet grunt och längs sträckan 900–1100 m fanns berg i dagen. Större stenar i terrassen på Orrsjöbäcksvägen avlägsnades med grävmaskin.

Teststräcka 1 användes för att testa metod 1, *infräsning av aska*. För att uppnå en höjning av tillgänglighetsklassen från C till A bedömdes att 20 cm överbyggnad behövde påföras. Detta innebar att grus (0–32 mm bergmaterial) och aska påfördes varpå de två materialen frästes in i den befintliga överbyggnaden. Vägen kompakterades med en vibrovält (Valtra jordbrukstraktor med CH 47 vält) sex gånger (tre tur- och returesor) varpå alla mätningar utfördes. Ett slitlager (5 cm) av bergkross (0–16 mm) lades ut till sist (Figur 2).

### Referenssträcka, 300 m

Referenssträckan ligger längs Åsjövägen efter teststräcka 1 (Figur 1). Liksom teststräckorna dikesrensades den innan försöken. Valet av placeringen byggde på att sträckan länkade samman två teststräckor men var olämplig som teststräcka för askblandning då den innehöll en bäcköverfart. En kraftig backe låg också mellan referenssträckan och teststräcka 2. För att höja tillgänglighetsklassen till A på denna sträcka påfördes ett 20 cm tjockt bärlager av bergskross (0–32 mm), som kompakterades med vält under sex överfarter (Figur 2). Åtgärd valdes för att motsvara en konventionell bärighetshöjning. Inget ytterligare slitlager lades på.

### Teststräcka 2, 1050 m

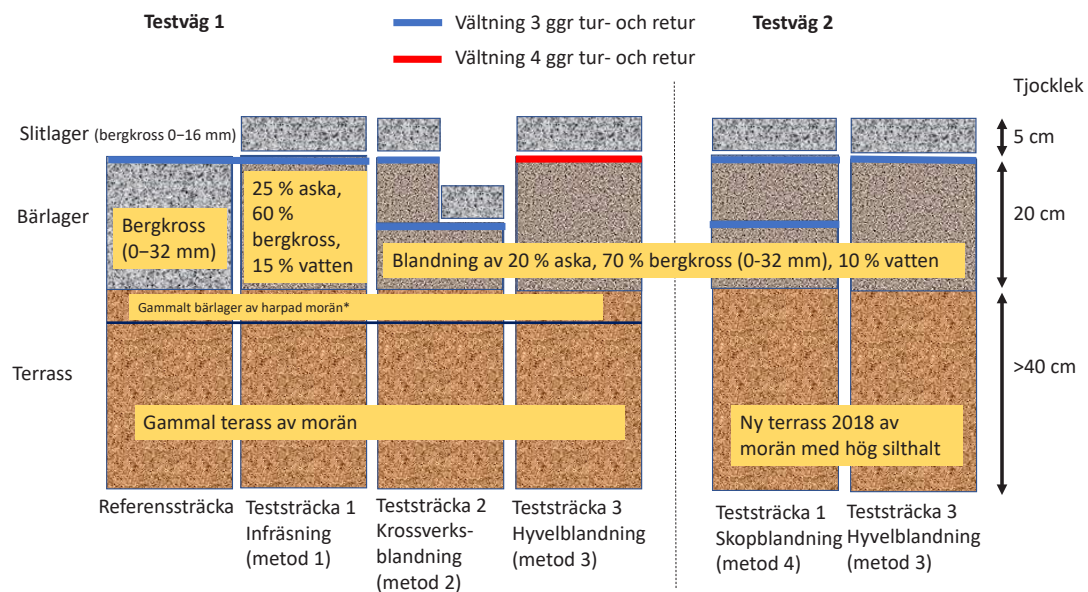
Teststräcka 2 placerades längs Åsjövägen bortanför referenssträckan och avslutades 50 m före en bäckpassage. På teststräcka 2 användes metod 2 för att påföra ett 20 cm tjockt lager av ask-grusblandning från krossverket. Askblandningen lades i två 10 cm tjocka lager, som vattnades och packades med vält efter utläggningarna (2×3 tur- och returresor totalt). På grund av brist på ask-grusblandningen under försöket lades endast ett 10 cm lager i slutet av sträckan (750–1050 m). Efter alla mätningar påfördes ett 5 cm tjockt slitlager av bergskross (0–16 mm, Figur 2).



Figur 1. Utsträckning av testväg 1 samt plats för tillredning och upplag. Provpunkterna för vattenproverna är markerade med kvadrater: före upprustningen (svart) och efter upprustningen, teststräcka 1 (blå), referenssträcka (grön), teststräcka 2 (röd) och teststräcka 3 (lila).

### Teststräcka 3, 900 m

Teststräcka 3 var den sista teststräckan på Åsjövägen och användes för att testa metod 3, det vill säga att på vägen blanda grus och aska med väghyvel till en tjocklek av 20 cm. Ett avbrott i askanvändningen gjordes 350–500 m in på sträckan, där endast ett bärlager av krossat berg (0–32 mm) användes, eftersom två bäckar passerade vägen där. Vägen vältades åtta gånger (fyra tur- och returesor) varpå mätningar utfördes innan ett 5 cm tjockt slitlager (0–16 mm) påfördes (Figur 2).



Figur 2. Schematisk skiss av de olika teststräckorna/metoderna. Observera att mätningarna är utförda innan slitlagret lades ut. \*harpad morän innebär att större stenar har sorterats ut från materialet. Procenthalterna är i viktsprocent av tillsatt material, det vill säga askan och bergkrossen innehöll en okänd fukthalt vid blandningstillfället.

### Testväg 2, Tjärdalsbergsvägen

Testväg 2, Tjärdalsbergsvägen, är lokaliserad i Sundsvalls kommun, söder om byn Nora (Figur 3). Vägen består av en äldre väg, som terrasserades om under sommaren 2018. Den är också förlängd samt har fått en ny drainering och kan därför ses som en nybyggnation. Terrassen kompakterades innan försöken påbörjades. Trots en torr sommar 2018 var terrassen fuktig, vilket sannolikt beror på att marken var finjordsrik och grundvattenytan låg nära markytan på grund av den ytliga berggrunden. Tillgänglighetsklassen på vägen var D (endast trafik på frusen mark) och en uppgradering till tillgänglighetsklass B skulle åstadkommas. Vägen var betydligt kortare än testväg 1, så mätpunkterna i hjulspåren fick placeras ut med 20 m avstånd, istället för 50 m, både på höger och vänster sida. Dessa punkter användes igenom hela projektet för att mäta bärighet och tjocklekar på de olika lagren. Testvägen delades in i tre teststräckor:

- Teststräcka 1, 400 m (metod 4, blandningsskopa)
- Teststräcka 2, 100 m (metod 3, förtest av hyvelblandning)
- Teststräcka 3, 200 m (metod 3, hyvelblandning)



Figur 3. Utsträckning av testväg 2 samt plats för tillredning och upplag.

Testsväg 2 hade till skillnad mot testväg 1 väldigt glest med mötesplatser och kojplaner, vilket ledde till ett mer komplicerat förfarande vid utförande av arbetet.

### Teststräcka 1, 400 m

Teststräcka 1 bestod till hälften av nybyggnation, då vägen behövde läggas i ett lägre terrängläge för att öka avståndet mellan vägens yta och en högspänningsledning som passerade vägen. Detta medförde att sträcka 60–200 m fick en fuktig terrass, medan sträcka 200–400 m fick en relativt torr terrass. Sträckan användes för att testa metod 4, det vill säga färdig ask-grusblandning som tillreddes på upplag med blandningsskopa monterad på grävmaskin. Askblandningen lades ut i två lager à 10 cm för efterföljande vattning och packning (tre tur- och returresor per lager med vält) utfördes följt av mätningar. Därefter lades ett 5 cm tjockt slitlager (0–16 mm bergkross) ut (Figur 2).

### Teststräcka 2, 100 m

Teststräckan användes till att testa metod 4, det vill säga hyvelblandningsteknik, inför anläggning av Teststräcka 3 och användes inte för att analysera grustjocklek eller CBR-värden. Däremot togs fallviktsmätningar före och efter åtgärd.

### Teststräcka 3, 200 m

Teststräcka 3 bestod av den äldre vägkroppen som hade terrasserats om. Närhet till berg medförde att delar av vägen var fuktig, då grundvattnet låg ytligt och jorden var finkornsrik. Vägen användes för att testa metod 3, hyvelblandning (Figur 2).

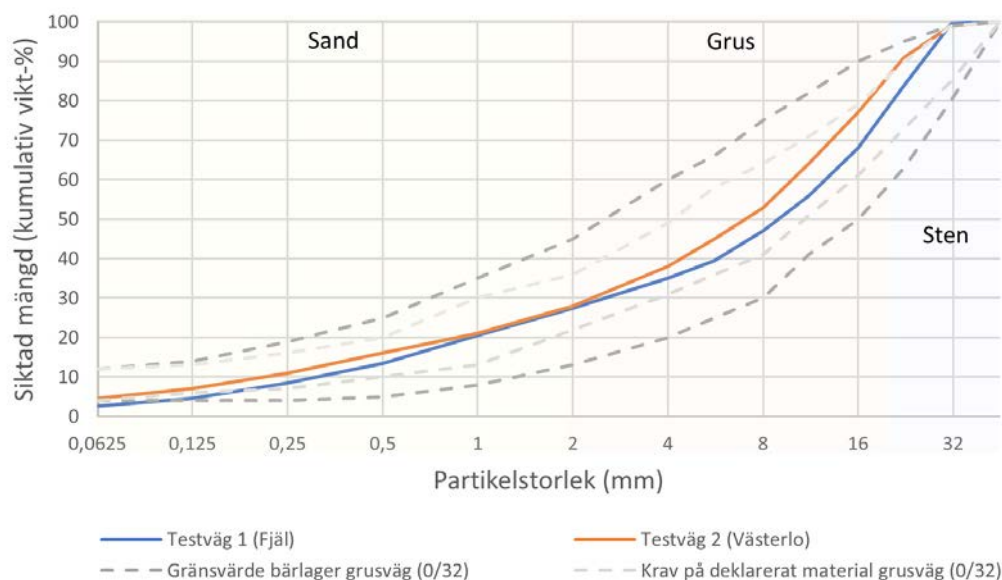
## BERGMATERIAL

### Fjäl

Till testväg 1 användes material från SCA krossprodukters täkt i Fjäl som innehöll krossat berg med en kornstorleksfördelning på 0–32 mm. Materialet hade en finkornsandel på 3 procent (baserat på torrsvikt) vilket är lägre än gränsvärdet för bärlager i grusväg (4 procent, figur 3). När aska blandades in ökade dock finkornsandelen. Täkten i Fjäl användes även för lagring av aska under täckpapp och den färdiga ask-grusblandningen i tälthall.

## Västerlo

Materialet som användes för testväg 2 var ett bärlager av krossat berg med fraktionen 0–32 mm och kom från SCA krossprodukters täkt Västerlo. Materialet hade en förhöjd andel grovt grus (16–20 mm) som låg på gränsen för vad som är tillåtet vid leverans (Figur 4). Även i detta fall ökade askan materialets finkornsandel så att en lämpligare nivå uppnåddes.



Figur 4. Siktcurvor med kornstorleksfördelning för det använda gruset till överbyggnadsmaterialet i testväg 1 (blå linje) och testväg 2 (orange linje). De streckade linjerna är gränsvärden för bärlager 0–32 mm vid leverans (ljusgrå) och i själva vägen (mörkgrå).

## ASKA

Askan som används i försöket var flygaska efter förbränning av biobränsle från Ortvikens Pappersbruk, panna 1 och 3. Askan lagrades vid Ortviken innan den kördes ut till mellanlagring vid tåkten i Fjäl (testväg 1), och till upplagsplats vid Högsjömon ca 4,5 km öster om tåkten Västerlo (testväg 2). Vid upplagsplatserna täcktes askan i Fjäl med täckpapp och vid Högsjömon med täckplast. I tabell 1 och 2 redovisas askans innehåll av kemiska föreningar och spårämnen. Totalt innehöll askan i nedanstående analys ca 84 procent torrsbstans och 16 procent fukt (metod: torkning 24 h i 105 °C). Vid provtagning i Ortviken brukar fukthalten variera mellan 13–17 procent (enligt Kerstin Andersson, processingenjör, SCA Graphic Sundsvall AB, 2019-10-14).

Tabell 1. Askans huvudsakliga innehåll (% torrsubstans, TS).

Förening	Andel (% TS)
CaO	30,9
SiO <sub>2</sub>	22,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,03
K <sub>2</sub> O	4,82
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,89
MnO	2,5
MgO	2,38
Na <sub>2</sub> O	1,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,64
TiO <sub>2</sub>	0,192
<b>Summa</b>	<b>79,4</b>

Tabell 2. Askans innehåll av övriga spårämnen (mg/kg TS).

Ämne	Värde (mg/kg TS)
As	3
B	315
Ba	2740
Be	0,683
Cd	5,5
Co	7,73
Cr	28
Cu	84
Hg	0,0963
Mo	3,12
Nb	5,68
Ni	26,3

Ämne	Värde (mg/kg TS)
Pb	28,1
S	11 400
Sc	2,26
Se	1
Sn	1,02
Sr	602
V	18,6
W	50
Y	7,59
Zn	2670
Zr	52,9
Cl	0,7

## Recept på askblandning

Målet i försöket var att använda en hållfast och likvärdig askblandning på de olika delsträckorna. För design av receptet togs hjälp av Josef Mácsik från företaget Ecoloop. Tidigare studier har visat att en blandning med 30 procent aska ger en högre hållfasthet än en blandning med 20 procent men kräver också att mer vatten arbetas in i blandningen för att kunna uppnå en hög packningsgrad (Vestin m.fl. 2011). I studien av Vestin m.fl. (2011) användes flygaska från samma pannor i Ortviken som i denna studie och i deras försök visade det sig vara svårt att blanda in tillräckligt mycket vatten i materialet. För att underlätta byggandet togs därför beslutet att testa 20 procent askinblandning för att lättare kunna arbeta in vattnet. Hur mycket aska man behöver beror på vilken typ av aska man använder, då dess egenskaper beror på bränsle, förbränningstemperatur, panntyp m.m. (Mácsik m.fl. 2004).

Den slutliga blandningen (metod 2–4) för överbyggnadsmaterialet bestod av 70 procent grus, 20 procent aska och 10 procent tillsatt vatten (viktpcent). När det gäller fräsning (metod 1), var det planerade receptet: 50 procent grus, 20 procent befintlig överbyggnad, 20 procent aska och 10 procent vatten, men på grund av svårigheter att blanda in befintlig överbyggnad blev det slutgiltiga receptet (*testväg 1, Teststräcka 1*): 25 procent aska, 60 procent bergkross och 15 procent vatten. Det innebär att det slutgiltiga askinnehållet blev högre för metod 1 (infräsning) än för de andra metoderna.

## BÄRIGHETSMÄTNINGAR M.M.

### California Bearing Ratio, CBR

I denna studie mättes överbyggandens bärighet i termer av California Bearing Ratio (CBR), för att kunna jämföra mot tidigare studier av spårbildning på skogsbilvägar (Bergqvist m.fl., 2015). Mätningarna gjordes innan slitlagret påfördes på samtliga sträckor (Figur 2). CBR är en amerikansk standard för att beskriva ett vägmateriels bärförmåga (ASTM, 2003). Bärförmågan bestäms genom ett penetrationstest (oftast i laboriemiljö), som mäter kraften per ytenhet för att föra ned en standardiserad

cylinder i ett material i en standardiserad hastighet (den kraft som krävs för att pressa en cylinder med diameter 50 mm i en hastighet av 1,25 mm/minut ned i materialet). Måttet uttrycks i procent gentemot värdet från ett standardmaterial (krossad kalifornisk kalksten) och beräknas enligt formeln:

$$CBR = \frac{p_1}{p_2} \times 100$$

$P_1$  =kraft/ytenhet, N/mm<sup>2</sup> i aktuellt material,

$P_2$  =kraft/ytenhet, N/mm<sup>2</sup> i aktuellt material,

### Dynamisk konpenetrometer, DCP

I denna studie användes dynamisk konpenetrometer (DCP) för att avläsa vägens CBR-värde (Figur 5), eftersom laborietest inte var möjligt att tillgå i projektet. DCP är också den lämpligaste metoden för CBR-uppskattning i fält, då den är lätt att använda och internationellt vedertagen, om än inte lika noggrann som ett laborietest. Den dynamiska konpenetrometern är en enkel konstruktion, bestående av en standardiserad kon som slås ner i vägen via slagkraft från en 8 kg tung vikt som faller fritt längs en 575 mm lång vertikalgejd. Instrumentet används så att spettets nedträngning  $z_i$  i materialet registreras för varje slag nr  $i$ . Från den skillnad i nedträngning  $\delta_i = z_i - z_{i-1}$  som ett slag med konpenetrometern ger, beräknas CBR-värdet på aktuellt djup ur (User guide to DCP, 1996)

$$\log CBR_i = 2.46 - 1.12 \log \delta_i. \quad (1)$$

Från en serie om  $N$  slag kan således en CBR-profil för olika djup från vägytan bestämmas. Det är inte uppenbart hur ett representativt medelvärde för profilen ska beräknas. Att ange det aritmetiska medelvärdet för alla CBR-värden, slag för slag, vore missvisande. Om konen träffar en mindre sten kommer ett antal slag ge extremt höga CBR-värden, tills hindret passerats eller mätningen avbryts. Omvänt kan en mjuk region passeras med ett fåtal slag. Det är därför rimligare att beräkna ett viktat medelvärde enligt

$$\overline{CBR} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i CBR_i}{\sum_{i=1}^N \delta_i}. \quad (2)$$

På så sätt får längre sträckor med lägre CBR-värden större vikt än korta sträckor med högre värde, och lokala störningar i form av stenträffar får liten inverkan på medelvärdet. Detta sätt att ange medelhården har använts för experimenten i denna rapport.

Notera att koefficienten 1.12 ligger nära 1, varför grovt gäller att

$$CBR_i \approx \frac{288}{\delta_i},$$

Då den medelkraft som krävs för att bromsa upp ett föremål (spettet efter träff av glidhammaren) är omvänt proportionell mot inbromsningssträckan motsvarar CBR-värdet ungefär den kraft som krävs för att driva spettet genom gruslagret. Därför gäller att

$$\overline{CBR} \approx \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i \frac{288}{\delta_i}}{\sum_{i=1}^N \delta_i} = \frac{288N}{\sum_{i=1}^N \delta_i} = \frac{288}{\bar{\delta}}. \quad (3)$$

Detta motiverar användning av medelvärdet för  $\delta_i$  i ekvation (1) för att enkelt beräkna ett medelvärde för CBR. Vi observerar även att

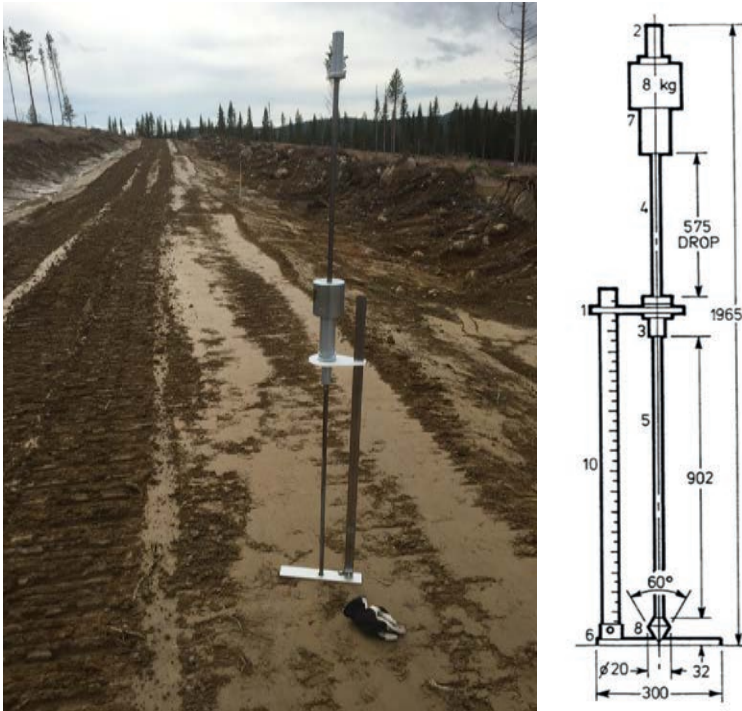
$$\frac{1}{\text{CBR}} \approx \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\delta_i}{288}}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\text{CBR}_i'}$$

vilket innebär att det föreslagna medelvärdet ungefär motsvarar det harmoniska medelvärdet av CBR registrerat slag för slag.

Flera av asklagren visade sig ge mycket höga CBR-värden och på motsvarande sätt var inträngningen för varje slag liten. Den noggrannhet på 0,5 mm man som bäst kan förvänta sig vid avläsningen av nedträngningen gör att det relativa felet i beräkningen av CBR-värdet från två på varandra följande slag kan bli stor. För en nedträngning på 3 mm rör det sig exempelvis om över 50 procent. CBR-profilerna i denna rapport är därför beräknade med ekvation (1) utifrån medelvärdet av inträngningen från fem på varandra följande slag. Då avläsningsfelet tar ut varandra mellan slagen förutom i första och sista av dessa fem punkter, blir ett på så vis beräknat löpande medelvärde mera representativt för det lokala CBR-värdet. Fem på varandra följande slag med en nedträngning om exempelvis 3 mm vardera ger på så vis ett fel på 8 procent.

Vid användning av DCP i stenigt material nöts konen fort. En nötning på maximalt 10 procent av ursprungsdiametern accepteras, det vill säga när en 20 mm kon har nöts ned till 18 mm ska den ersättas. Det är därför viktigt att ha med extra konspetsar vid mätning. Vid mätningarna användes kon med 60° spets. Målsättningen är att i varje provpunkt mäta ned till 30 cm djup från vägytan. Om stenträff omöjliggjorde detta flyttades provpunkten. Som stenträff räknas när nedsjunkningen är mindre än 3 mm/slag under tre på varandra följande slag.

## Fallvikt



Figur 5. Dynamisk konpenetrometer, DCP, i fält, samt ritning på instrumentet med måttuppgifter.



Vägens ytmodul ( $E$ ) undersöktes av Tyréns med tung fallviktsdeflektometer i varje kontrollpunkt av testväg 1 och 2, före respektive efter påförande av aska och överbyggnad (Figur 6). Deflektionen, det vill säga nedsjunkningen i vägen vid en given kraft, mäts och omvandlas till en elasticitetsmodul enligt följande formel:

$$E_0 = 1000 \frac{f(1 - \nu^2)\sigma_0 a}{D_0},$$

där  $E_0$  = ytmodul (MPa),  $f = 2$  för segmenterad belastningsplatta,  $D_0$  = deflektion ( $\mu\text{m}$ ) i centrum av belastningen,  $\nu$  = tvärkontraktionstalet,  $\sigma_0$  = kontakttryck (MPa) i centrum under belastningsplattan,  $a$  = belastningsplattans radie (mm).



Figur 6. Vagn för mätning med fallvikt (FWD).



### Mätning av askblandningens tjocklek

Askblandningens tjocklek mättes med rätskiva och mätsticka (Figur 7). Provgrop grävdes vid varje mätpunkt för att mäta avståndet från vägytan till terrassens yta.

Figur 7. Mätning av lagertjocklek efter upptagning av provgrop.

## BYGGMETODER

### Infräsning (metod 1)

På testväg 1, teststräcka 1, testades infräsning av aska i överbyggnaden (metod 1) med djupfräs (Carterpillar RM-300, Figur 8). Grusbilar påförde bergkross (0–32 mm) i ett 15 cm tjockt lager och materialet justerades med vägghyvel för att få rätt tjocklek. Därefter lades ett 10 cm tjockt lager flygaska på. Fräsningen startade vid sträcka 700–1100 m. Planen var att blanda in 5 cm av befintlig väg in i blandningen. Problem uppstod dock vid infräsningen då större stenar revs upp och orsakade problem vid blandningen och medförde högt slitage på utrustningen. Beslut fattades därför att endast blanda aska och bergmaterial.



Figur 8. Den använda vägfräsen, Caterpillar RM-300. Fräsning av teststräcka 1, testväg 1 (metod 1).

Efter fräsning vattnades blandningen med vattenbil och vägghyvel men det var svårt att få vattnet att tränga in i blandningen (Figur 9). Packning utfördes med vält (tre tur- och returesor).



Figur 9. Bevattning och inhyvling av vatten i fräsmassan

## Inblandning av aska vid krossning av bärlager (metod 2)

På testväg 1, teststräcka 2, testades en färdigblandad ask-grusöverbyggnad från tåkten i Fjäl. Vid krossningen användes: käftkross (Sandvik UJ440I), konkross (Sandvik UH440I), sorteringsverk (Keetrack Explorer H6 Sorteringsverk), grävmaskin (Volvo EC380) för inlastning av material i krossen och hjullastare (Volvo L180 H) för interntransport av material.



Figur 10. Tillredning av överbyggnadsmaterial av bergkross och aska. Grävaren till höger portionerar bergmaterial och aska enligt recept.

Vid krossningen av bergmaterialet blandades aska in direkt in förkrossen i samband med lastningen av berg. För att uppnå 20 procents inblandning av aska (viktsprocent) lastade grävmaskinen en skopa aska följt av två skopor berg (Figur 10). Aska och berg material blandades i tre steg: i käftkrossen följt av konkrossen och slutligen i sorteringsverket. Kraftig damning uppstod i processen, då bevattning inte kunde användas eftersom askan då hade börjat härda. Bevattning är annars brukligt vid krossning för att minska dammbildningen. Blandningen lagrades i en tälthall för att skydda materialet från fukt.

Efter lagring lastades blandningen på lastbil, påfördes vägen och jämnades ut med hyvel (Figur 11). Vid utbredning lades först ett lager av blandningen ut med en tjocklek på 10 cm, som vattnades och packades. Därefter påfördes ytterligare ett lager på 10 cm som vattnades och packades, dock så räckte inte blandningen till enligt planen. Detta föranledde att sträcka 750–1050 m endast fick en tjocklek av 10 cm.



Figur 11. Utläggning av askblandning från krossverket med lastbil och släp.

### **Inblandning med hyvel (metod 3)**

På testväg 1, teststräcka 2, testades att blanda in aska i gruset med hyvel (metod 3). Gruset påfördes med lastbil och justerades med hyvel till rätt tjocklek varpå askan spreds i ett lager på gruset. Hyveln gick fram och tillbaka sex gånger för att blanda materialet från sida till sida och vattenbilen arbetade kontinuerligt med hyveln för att vattna in materialblandningen så att vattnet blandades in på ett godtagbart sätt. När hyveln och vattenbilen hade blandat materialet justerade hyveln det sista, varpå packning utfördes.

Även på testväg 2, teststräcka 3, testades hyvelblandning, men hyveln blandade på ett annat sätt där hela blandningen flyttades från sida till sida, vilket krävde mer utrymme (Figur 13).



Figur 12. Aska och grusmaterial under blandning med vägghyvel på testväg 1.



Figur 13. Utlagd aska omedelbart före hyvelblandning på testväg 2.

#### **Blandning med blandningsskopa (metod 4)**

På testväg 2, teststräcka 1, användes en färdigblandning på samma sätt som testväg 1, sträcka 2, men aska och grus blandades med hjälp av en blandningsskopa (Allu DN 3-17) monterad på grävmaskin (Volvo EC 300EL). Blandningen skedde vid en gammal täkt (Högsjömon), dit materialet fraktades (Figur 13). Aska och grus placerades i varsin hög och däremellan stod grävmaskinen och lade två skopor grus och en skopa aska i en hög på mitten, vilken sedan blandades igenom med blandningsskopan. Det färdiga materialet täcktes i väntan på utkörning.

Blandningen kördes ut i två lager à 10 cm som packades och vattnades på samma sätt som på testväg 1, teststräcka 2. Dock var terrassen mjuk och blöt vilket ledde till spårbildning under utförandet, som åtgärdades med vägghvel.



Figur 14. Blandningsskopan i arbete på lagringsplatsen vid Högsjömon.

## LAGRING, TÄCKNING

I projektet användes tre typer av täckning:

### Täckning nr 1

Vid lagring av askan till testväg 1 (Fjäl) användes täckpapp, som vanligen används vid täckning av biobränsle (Figur 15). En grävmaskin/kranbil höll täckpapprollen och en eller två personer drog ut pappen och lade den på plats, varpå en hjullastare fick lägga fast den med grus.



Figur 15. Lagring av aska under täckpapp vid bergtäkten i Fjäl.

### Täckning nr 2

Den andra täckningsmetoden i Fjäl bestod i ett lagringstält (tälthall) som normalt används för lagring av sand- och saltblandning (Figur 16). Denna lagring var effektiv, då inga andra åtgärder krävdes utöver stackning med hjullastare. Tältet användes för lagring av färdigblandningen till testväg 1, teststräcka 2.



Figur 16. Lagringstältet (sandtältet) vid bergtäkten i Fjäl, som användes till att lagra färdig ask-grusblandning.

### Täckning nr 3

Ytterligare ett täckningstest utfördes, då plast i form av plansilofilm (Triosun 14mx50m) användes (Figur 17). Täckningen kunde utföras mycket enkelt av två personer och en maskin och med hållare. Dock förekom viss kondens under plasten (Figur 18).



Figur 17. Lagring av aska under täckplast vid bergtäkten i Fjäl.



Figur 18. Vissa problem med kondens under plasten förekom.

## TILLSTÅNDSPROCESS

### Miljö tillstånd

Hantering av aska är en anmälningspliktig verksamhet och därför uppfördes en anmälan om miljöfarlig verksamhet för testväg 1 till Timrå kommun och för testväg 2 till Sundsvall kommun. Tillstånd för lagring av aska söktes även för tåkten i Fjäl (testväg 1) och i Västerlo (testväg 2). Verksamhetskoder var enligt miljöprövningsförordningen 90.40 och 90.141. Kontrollprogram upprättades för de två vägarna och dessa, samt anmälan och beslut, bifogas i slutet av denna rapport.

När ansökan/anmälan ska göras är det viktigt att vara ute i god tid, då handläggningstiden är minst sex veckor. I vårt fall var tiden mellan anmälan och beslut 6–8 veckor. Det är också viktigt att beskriva tydligt hur man har planerat arbetet samt skapa ett egenkontrollprogram, vilket också måste följas upp.

Beslutet från Timrå kommun villkorades med följande krav:

1. Ytorna ska utformas så att avrinning kan ske. Ytorna ska underhållas kontinuerligt för att upprätthålla sin funktion så att begränsad perkolation sker.
2. Slitlagret ska underhållas så att det säkerställs att lagret är den tjocklek som anges i anmälan.
3. Aska ska användas ovan högsta grundvattennivå.
4. Aska ska användas där den inte riskerar att påverkas av höga nivåer och flöden i sjöar och vattendrag. Vid bedömning ska hänsyn tas för flöden för ett förändrat klimat. Bedömningen ska kunna redovisas för tillsynsmyndighet innan arbete påbörjas.
5. Lagring av aska i bergtåkten ska ske täckt och ske så att mark och vatten inte förorenas.
6. Hantering av aska ska anpassas till rådande väderlek för att begränsa risken för spridning med vind och vatten.
7. Transport av aska ska ske i täckta behållare.
8. Dokumentation om var avfall använts i vägkonstruktionen ska göras inför framtida åtgärder i området.
9. Meddelande till tillsynsmyndigheten när byggande av skogsbilvägen startar så att myndigheten har möjlighet att göra tillsynsbesök på plats.



### Provtagning av dikesvatten i fält vid väg

För att se om dikesvattnet blivit kontaminerat av askvägsbyggandet togs vattenprover för vattenkemi i diken eller i slamgropar i anslutning till dessa längs testväg 1 (Figur 19, Figur 1). Sommaren 2018 var dock ovanligt torr vilket ledde till att det var svårt att finna vattensamlingar i diken. Innan vägbyggnationen (inklusive dikesrensning) påbörjades, togs två vattenprov längs testväg 1 (Figur 1, Tabell 3) och skickades till Umeå för analys (SYNLAB Analytics & Services Sweden ABS). Vattnet samlades in i nya, rena behållare (tre flaskor per provpunkt) som erhållits från Synlab. Dessa lades i en kylväska med kylklampar och skickades direkt till Umeå för analys. Uppföljningsprover togs ca en månad efter upprustningen i en provpunkt (tre behållare) på varje teststräcka och på referenssträckan (Tabell 3).



Figur 19. Provtagningspunkt i en slamfälla längs teststräcka 3 som preparerats med hyvelblandning.

Tabell 3. Ämnesinnehåll i vattenproverna, inklusive gränsvärden för dricksvatten enligt SLV FS 2001:30.

Provplats	Sträcka 1 dike uppströms	Sträcka 2 dike uppströms	Efter upprustning av väg 1 med aska och grus					Gränsvärden för dricksvatten (tjänligt med anmärkning)  SLV FS 2001:30
			Referens- träcka	Fräs (1)	Krossverks- bland. (2)	Hyvel (3)	Askklump <sup>1</sup> (hyvel)	
			utlopp trumma nedströms	utlopp trumma nedströms	utlopp trumma nedströms	slamgrop uppströms	slamgrop uppströms	
<b>Antimon</b> (µg/l)	<0,1	<0,1	-	-	-	-	-	5
<b>Arsenik</b> (µg/l)	0,12	0,27	0,37	1,1	0,68	0,24	1,5	10
<b>Barium</b> (µg/l)	4,9	9,7	8	11	5,3	8,7	33	
<b>Bly</b> (µg/l)	0,077	0,39	0,32	0,26	0,2	0,1	0,66	10
<b>Kadmium</b> (µg/l)	0,015	0,06	0,03	<0,01	0,015	0,03	0,095	5
<b>Kobolt</b> (µg/l)	0,31	0,63	1,4	0,93	0,52	1,3	0,91	
<b>Koppar</b> (µg/l)	1	1,8	1	0,4	0,87	1,3	5,2	200
<b>Krom</b> (µg/l)	0,34	0,48	0,9	1,0	0,54	0,58	1,4	50
<b>Kvicksilver</b> (µg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1
<b>Molybden</b> (µg/l)	<0,1	<0,1	-	-	-	-	-	
<b>Nickel</b> (µg/l)	0,64	0,91	0,95	0,86	0,81	0,95	1,4	20
<b>Vanadin</b> (µg/l)	0,16	0,37	0,87	2	0,54	0,42	1,5	
<b>Zink</b> (µg/l)	3,3	9,3	8,1	5,4	2,8	13	15	
<b>Klorid</b> (mg/l)	-	-	3,6	1,5	1,5	2	5,1	100
<b>Sulfat</b> (mg/l)	-	-	4	2,5	2,9	2,1	22	100
<b>TOC</b> (mg/l)	-	-	9,3	13	9,7	6,2	19	
<b>pH</b>	-	-	5,6	6,0	7	6,6	8,2	

<sup>1</sup>Provet togs i en slamgrop uppströms precis intill en mycket stor askklump.

Alla koncentrationer låg mycket under gränsvärdena för dricksvatten (SLVFS 2001:3) vid båda mättillfällena (Tabell 3). I den andra provtagningspunkten längs teststräcka 3 låg en stor askklump i slamgropen och ett prov togs här för att se om det verkade vara någon direkt kontaminering från själva askklumpen. Detta prov hade högst värden för arsenik, barium, bly, kadmium, koppar, krom, nickel, zink, klorid, sulfat, totalt organiskt kol och pH men var fortfarande långt ifrån gränsvärdena för dricksvatten (Tabell 3). Notera att det provtagna vattnet inte har perkolerat genom själva väggkroppen då proverna är tagna antingen uppströms vägen eller nedströms där trummor mynnar ut. Då perioden varit mycket torr består vattnet antagligen till största del av grundvatten som kommer från uppströms vägen. Eventuell kontaminering av dikesvattnet kommer alltså från aska/grus vid själva byggandet och möjligtvis till viss del ytavrinning vid regn. Det är också troligt att vattnet i slamgroparna var mer koncentrerat än vattnet som provtogs nedströms trummorna och värdena kan därför inte jämföras sinsemellan. Det går inte heller att jämföra värdena före och efter åtgärd då proverna inte är tagna på samma ställe.

## **ARBETSMILJÖ ASKA/TRAFIK**

Vid askhantering är det viktigt att använda personskydd i form av andningskydd, skyddsglasögon, handskar och heltäckande klädsel. Ögonduschar fanns att tillgå i rastvagnen och i välten, och vatten fanns vid maskinerna så att huden kunde sköljas vid behov. Vid hantering av aska ska försiktighet iakttas då den är kraftigt basisk och kan ge sveda samt andningsproblem. Damning är det främsta riskmomentet och vid blandning/krossning. Även vid täckning och i vissa delar av mätningarna var det svårt att undvika dammexponering. För fordonsförarna var det viktigt att ha övertryck i hytterna och att kontrollera kupéfilter.

Trafiksituationen är ett generellt riskmoment vid användande av aska på skogsbilvägar. Då man har flera maskiner på en smal väg gäller det att fordonen har kontakt med varandra och att varselkläder används utanför maskinerna.

### **Maskinslitage/rengöring**

Askan tenderade att fastna på maskinerna, varför det var viktigt att rengöra dem efter användning för att undvika onödigt slitage. Det är också viktigt att kontrollera luftfilter och kylare regelbundet.

# Resultat och diskussion

## TESTSTRÄCKORNAS EGENSKAPER

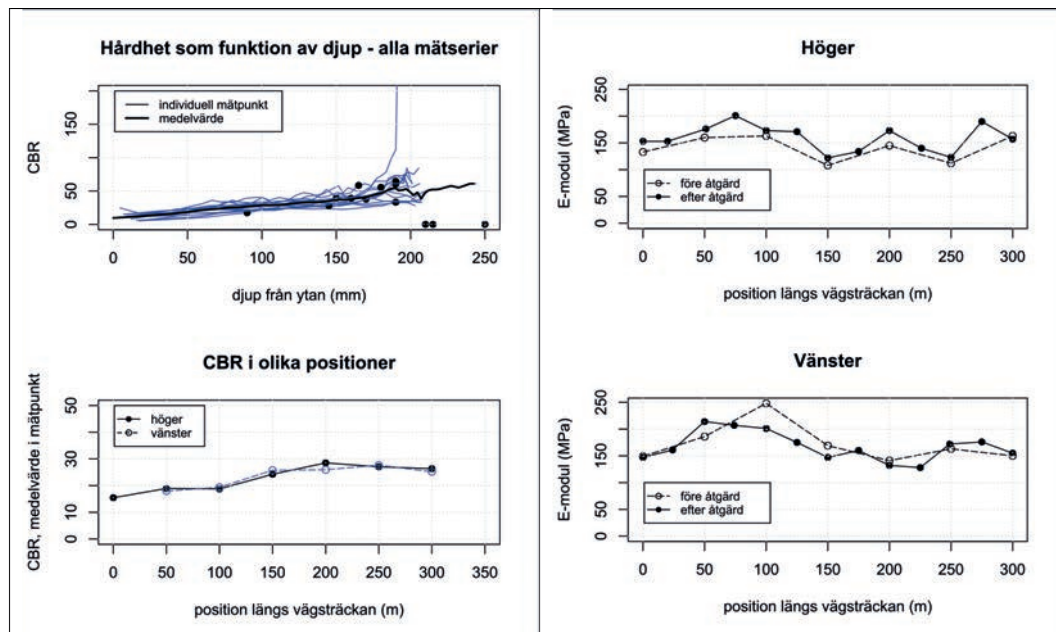
Figur 20a–Figur 25a redovisar det uppmätta CBR-värdet som funktion av djupet från vägens yta för varje mätpunkt på aktuell vägsträcka. I graferna indikeras också bärlagrets faktiska tjocklek med svarta punkter. I de fall punkten ligger på abskissan (”x-axeln”) har mätningen avbrutits innan asklagrets botten nåtts. I figurerna visas även CBR-värdet i medeltal (alla punkter på respektive vägsträcka) som funktion av djupet (svart linje). Det genomsnittliga CBR-värdet för de översta 150 mm av vägen visas i figur b och E-modul för höger och vänster hjulspår visas i figur c–d. I Tabell 4 presenteras tjockleksmätningarna tillsammans med medelhårdheten (CBR) för respektive sträcka/metod.

Tabell 4. Nominell och faktisk tjocklek samt medeltjocklek och medelhårdhet för de olika sträckorna/metoderna. Standardavvikelse för CBR-värdet står inom parentes.

Teststräcka	Testväg 1		Testväg 1 och 2		Testväg 2
	Ref. sträcka	1. Infräsning	2. Krossverksblandning	3. Hyvelblandning	4. Blandningsskopa
Nominell tjocklek (mm) bärlager	200	200	200 (punkt 1–15) 100 (punkt 16–22)	200	200
Faktisk tjocklek (mm) bärlager	80-250	80-180	110–265 (punkt 1–15) 55–165 (punkt 16–22)	65–205 (väg 1) 90–170 (väg 2)	110-230
Medeltjocklek (mm)	170	124	170 (punkt 1–15) 88 (punkt 16–22)	121 (väg 1) 128 (väg 2)	171
Medelhårdhet (CBR)	25 (6,2)	58 (18)	70 (13) (punkt 1–15)	31 (7,4) (väg 1) 29 (7,5) (väg 2)	47 (19)

## Referenssträcka (testväg 1)

Referenssträckans hårdhet uppvisar liten variation mellan mätpunkterna (Figur 20a). Hårdheten går från ca 10 CBR till 50 CBR vid bärlagrets botten. Medelhårdheten för de översta 150 mm av gruslagret varierar svagt längs vägens sträckning, men skillnaden mellan höger och vänster sida av vägen är försumbar (Figur 20b). Sträckan uppvisar bara en svag, icke signifikant, höjning av E-modulen genom åtgärden (Figur 20c-d). Korrelationen mellan uppmätt E-modul och CBR-värde är till och med negativ (Tabell 5), vilket skulle kunna förklaras av att bärlagret är mjukt i förhållande till terrassen och i hög grad dominerat av den senares egenskaper. Små skillnader och få datapunkter gör dock att betydelsen av iakttagelsen inte ska överbetonas.

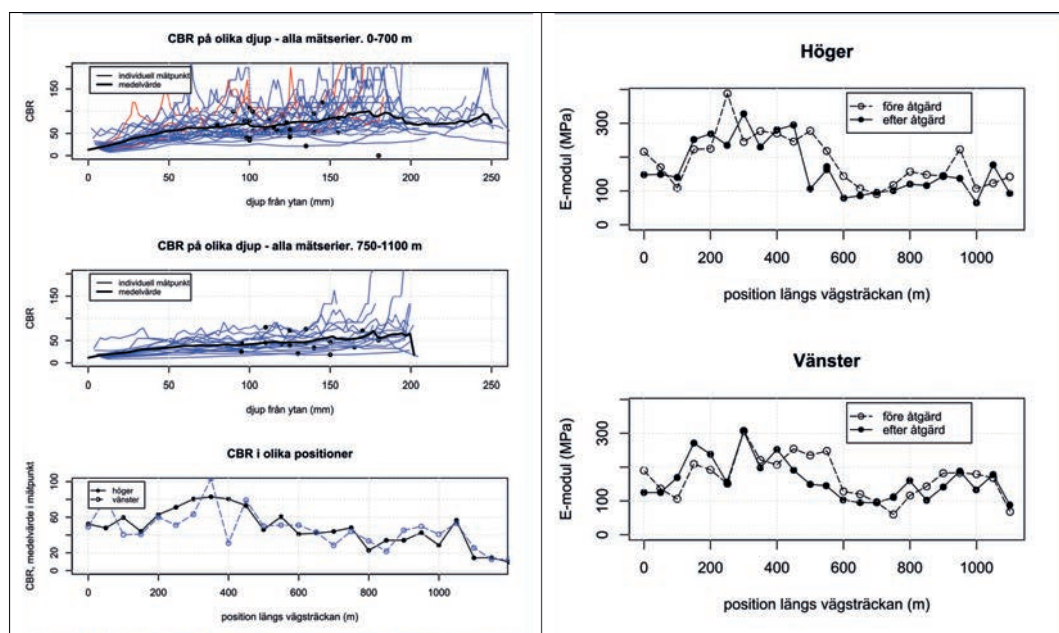


Figur 20. Hållfasthet i CBR (20a) samt ytmodul (20b) för referenssträckan.

## Metod 1: infräsning (testväg 1, teststräcka 1)

Sträckan kan delas in i två sektioner utgjorda av punkterna 1–15 samt punkterna 16–23. Bevattningen av den andra sektionen lyckades inte så väl, på grund av att den starka lutningen hos vägen fick vattnet att rinna av innan det sögs upp av materialet. En klar skillnad i resultatet kan också observeras (Figur 21). För den första sektionen varierade uppmätt CBR i genomsnitt från 15 vid ytan till ca 50 på 50 mm djup och närmare 100 på 175 mm djup. Dock föreligger mycket stor variation med omväxlande extremt hårda punkter (CBR över 150) och punkter med en hårdhet under 25. Den andra sektionen uppvisar en hårdhet på i genomsnitt ca 15 vid ytan och ca 50 på 150 mm djup. Även här är variationen stor, men hårdhetsvärdena är överlag lägre än för den första sektionen. Några av punkterna är inte hårdare än vad som konstaterades för det obundna lagret på referenssträckan.

Vägen har från början en hög styvhet, vilken inte påverkas signifikant av beläggningen med bärlagret. I en given mätpunkt uppvisar CBR-värdet betydande variation med djupet, och profilmedelvärdet varierar längs vägen. Korrelationen mellan vänster och höger sida är 0,85, vilket antyder att lokala egenskaper hos terrassen är viktiga för den resulterande hårdheten i bärlagret, eftersom terrassens egenskaper kan antas variera marginellt på en längdskala om ett fåtal meter.



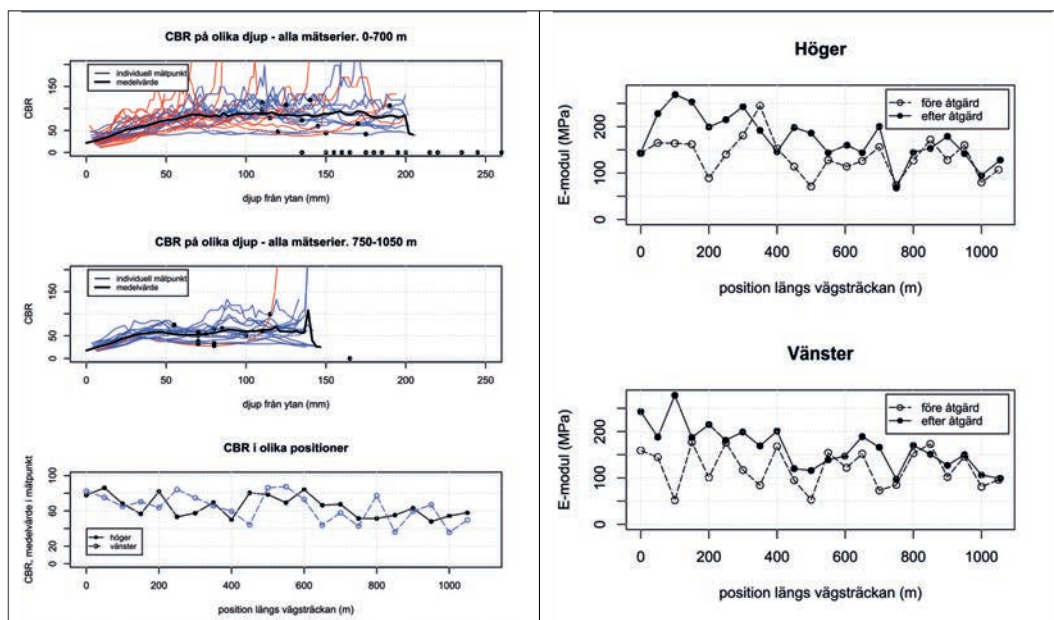
Figur 21. Hållfasthet i CBR samt ytmodul för sträckan där aska och grus blandats med fräs. De två översta diagrammen i 21a visar hårdhetsvariationen med djupet för varje individuell mätpunkt (tunna linjer) samt medelvärden för samtliga delsträckans mätpunkter (tjock linje). Det nedersta diagrammet i 21a visar medelhårdheten i varje mätpunkt längs sträckan, på höger (heldragen) samt vänster (streckad) sida.

## Metod 2: krossverksblandning (testväg 1, teststräcka 2)

Den vägsträcka som belagts med en nominellt 200 mm tjock färdigpreparerad blandning av grus och aska från krossverket uppvisar över lag den högsta hårdheten (Figur 22, Tabell 4). Medelhårdheten ligger högre än för de andra metoderna (ca 80 på ett djup mellan 70 mm och 170 mm). Spridningen är stor och antalet mätningar som registrerats som "stenträff" är så stort i förhållande till vad som är fallet med andra metoder, att man kan anta att materialet egentligen varit så hårt att mätningen måste avbrytas. Det kan också tänkas att även en mindre sten, vilken för ett lösare bärlager kan makas åt sidan med ett par slag, ligger så fast i den brunna ask-grusblandningen att mätningen inte kunnat fortsätta. Den stora variationen till trots ligger även de hårdhetsmässigt sämsta punkterna över vad som i bästa fall noteras för ett obundet bärlager.

För det nominellt 100 mm tjocka bärlagret planar hårdheten ut vid ett CBR-värde strax över 50 på ett djup av 40 mm (Figur 22). I de flesta punkter är bärlagrets tjocklek samlade kring ca 75 mm. Man skulle kunna förvänta sig en tydlig minskning av hårdheten när bärlagret passerats, men mätningarna visar inte det. Anledningen är oklar, men en hypotes är att nedträngande aska i samband med ymnig bevattning verkar som en förstärkning av terrassen.

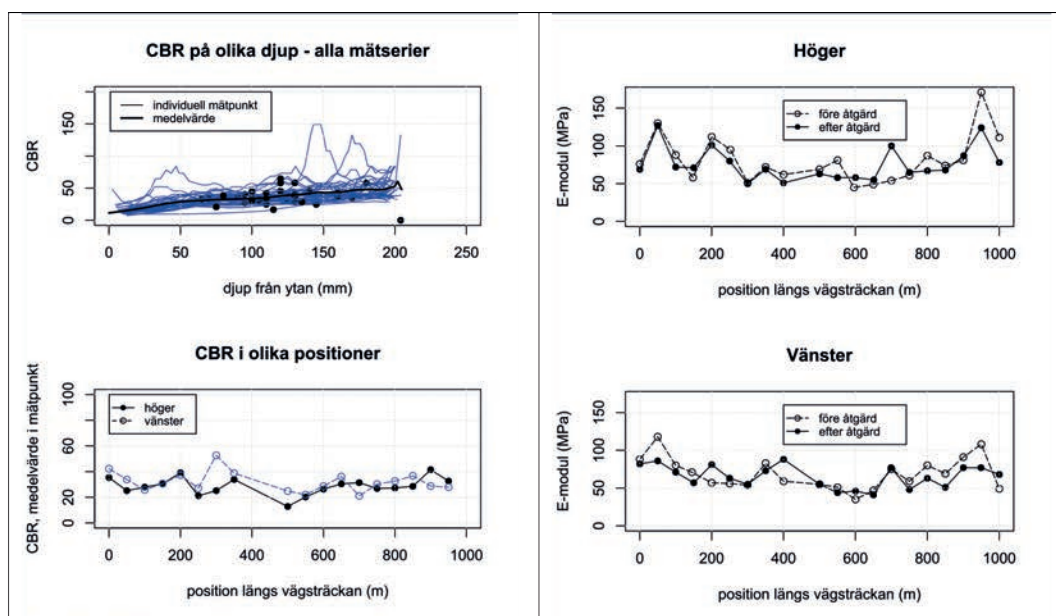
Vägen visar en statistiskt signifikant (tvåsidigt t-test på 95 procentsnivån) ökning av ytmodulen efter beläggningsåtgärden (Figur 22c-d). I genomsnitt ökar styvheten med 41 MPa. De första 700 m av testväg 1, sträcka 2, med askblandning belades i två skikt om vardera 100 mm med vältning efter varje skikt. Här ser vi också den största förändringen i E-modulen, 56 MPa i medeltal. Återstående del belades med endast ett skikt, eftersom överbyggnadsmaterialet som tidigare nämnts tog slut.



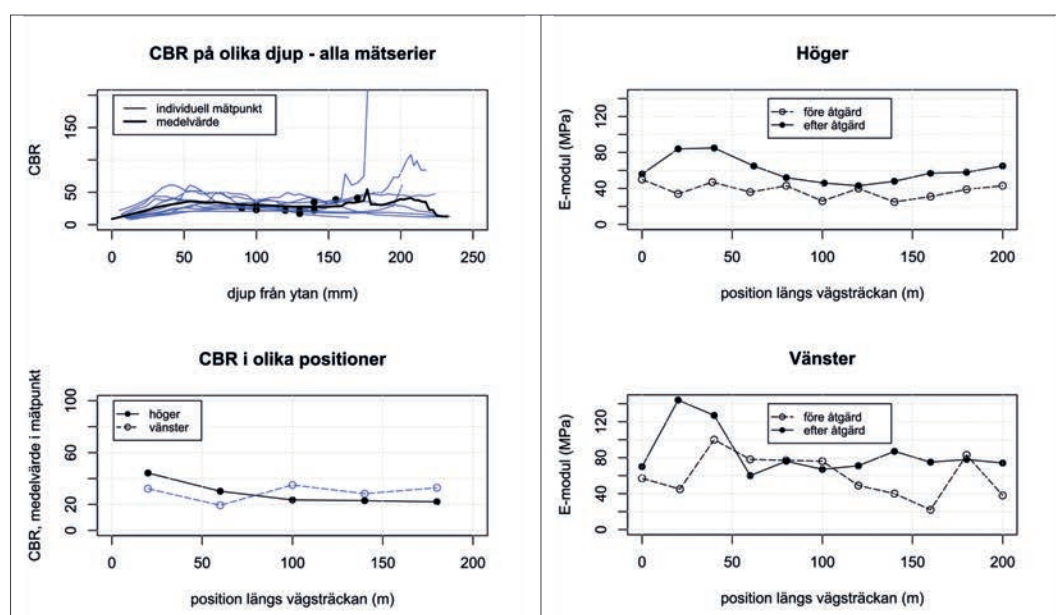
Figur 22. Hållfasthet i CBR samt ytmodul för sträckan som belagts med krossverksblandning.

### Metod 3: hyvelblandning (testväg 1 och 2, sträcka 3)

Den del av den uppgraderade vägsträckan där aska och grus blandats på plats med hjälp av vägghvel uppvisar ett mjukt resultat med jämförelsevis liten variation mellan mätpunkterna (Figur 23 och Figur 24). CBR går i medeltal från ca 10 vid ytan till 50 på 200 mm djup. Detta skiljer sig inte väsentligt från teststräckan, med undantaget att variationen är något högre. För den nybrutna vägen (testväg 2, sträcka 3) är antalet datapunkter litet, men ungefär samma resultat kan skönjas. CBR-värdet planar ut kring 35 på 50 mm djup, och är sedan konstant till botten av bärlagret. En skillnad mellan terrasserna på de två testvägarna där hyvelblandning utförts är att E-modulvärdet hos testväg 2 före åtgärd generellt är väldigt lågt. Detta kan tänkas ge sämre förutsättningar för packning av bärlagret, men statistiskt går en sådan effekt inte att utläsa genom att jämföra mätpunkterna längs testväg 2 (sträcka 3).



Figur 23. Hållfasthet i CBR samt ytmodul för den del av testväg 1 där aska och grus blandats med vägghvel.



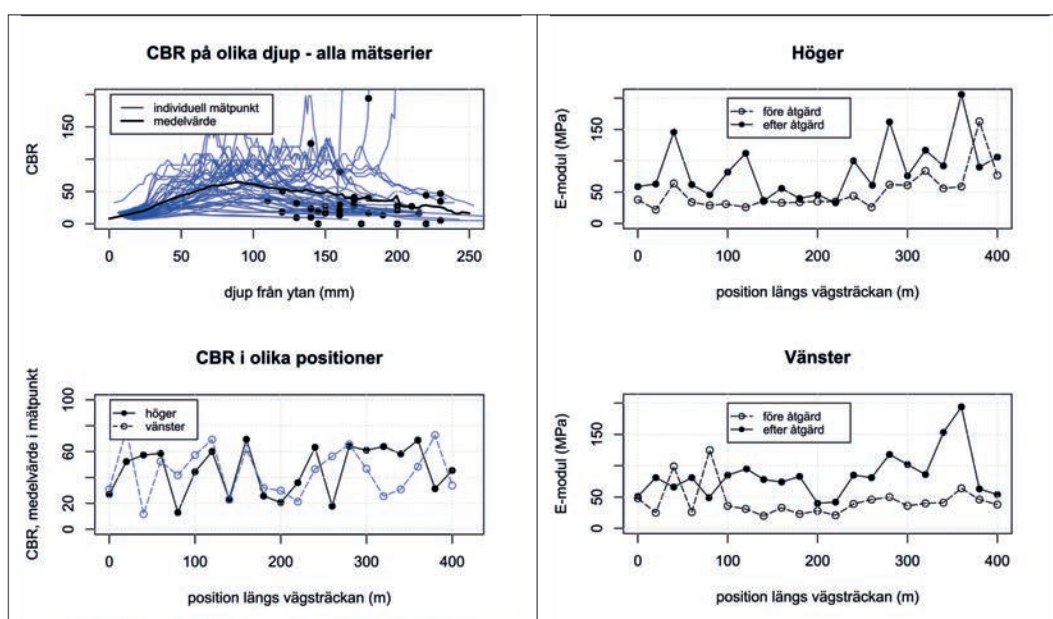
Figur 24. Hållfasthet i CBR samt ytmodul för den del av testväg 2 där aska och grus blandats med vägghvel.



## Metod 4: tillredning med blandningsskopa (testväg 2, sträcka 1)

Den sträcka som belades med ett bärlager tillrett i blandningsskopa visar i genomsnitt mycket höga CBR-värden (Figur 25). Dock är variationen avsevärd, med omväxlande mycket hårda punkter och punkter som inte är hårdare än referenssträckan. En del av vägsektionen låg i en sänka och var därför blötare än andra delar. Någon stor skillnad i resultat mellan blöta och torra sektioner kan dock inte observeras, förutom en viss antydning till en större hårdhet för den blöta sektionen på djup över 130 mm, vilket i princip skulle kunna förklaras med att askan haft bättre förutsättningar att brinna.

Vägytans elasticitetsmodul uppvisar en markant och statistiskt signifikant (tvåsidigt t-test på 95 procentsnivån) höjning i och med åtgärden. Ökningen sker från mycket låga värden, vilket gör att resultatet inte säkert är jämförbart med dem för anläggningarna längs väg 1.



Figur 25. Hållfasthet i CBR samt ytmodul för sträckan som belagts med blandningsskopa.

## SAMBAND MELLAN CBR-VÄRDEN OCH ELASTICITETSMODUL

Ur ett generellt mekaniskt perspektiv är CBR-värde och elasticitetsmodul två skilda begrepp. Det förra är ett lokalt brottmekaniskt mått, styrt av materialegenskaper i konprobens omedelbara närhet. Det senare styrs av elasticitetsegenskaperna hos materialet i en omgivning till testplattan, som i praktiken sträcker sig en meter ner i vägbanan. För vägkonstruktioner vars materialegenskaper och lagertjocklekar varierar inom ”normala” ramar finns förvisso en stark statistisk korrelation mellan uppmätta CBR-värden och E-moduler, men försiktighet är på sin plats vid tolkning av resultat från nya material eller anläggningstekniker.

Resultaten av mätningarna visar generellt en positiv, om än ganska låg, korrelation (Tabell 5) mellan lokalt uppmätt CBR-värde (medelvärde i ask/gruslager) och E-modul efter åtgärd ( $E_1$ ). Siffrorna bör tolkas med viss försiktighet eftersom lokalt uppmätta CBR-värden för några av sträckorna har en hög varians, och det är svårt att avgöra huruvida en uppmätt CBR-profil är representativ för en omgivning till mätpunkten stor nog att diktera observerad E-modul. För referenssträckan och sträcka 3 på testväg 2 är också antalet jämförda punkter lågt.

Tabell 5. Förändring av ytmodul för de olika teststräckorna samt korrelationskoefficienter för sambandet efter (E1) och före (E0) åtgärd. P-värden har beräknats med tvåsidigt t-test. Signifikanta p-värden ( $p < 0,05$ ) är markerade med fet stil. Korrelationskoefficienter mellan ytmoduler och CBR-värden samt mellan ytmoduler före och efter åtgärd.

Väg	Metod (sträcka)	Förändring i E (MPa)	p-värde	Cor (E <sub>0</sub> , CBR)	Cor (E <sub>1</sub> , CBR)	Cor (E <sub>1</sub> , E <sub>0</sub> )	Antal jämförda punkter
Testväg 1	Referenssträckan	+10	0,13	-0,27	-0,48	0,73	14
	1. Infräsning (1)	-16	0,053	0,55	0,57	0,68	46
	2. Krossverksblandning (2)	+41	<b>2,6e-6</b>	0,083	0,34	0,37	44
	3. Hyvelblandning (3)	-4,9	0,086	0,040	0,11	0,76	36
Testväg 2	4. Blandningskopa (1)	+38	<b>1,6e-6</b>	-0,0017	0,45	0,22	42
	3. Hyvelblandning (3)	+23	<b>3,3e-4</b>	0,072	0,46	0,37	10

På fyra av vägsektionerna synes E-modulen vara oförändrad av åtgärden, medan den på tre av sektionerna ökat. Tabell 5 visar den genomsnittliga förändringen, samt p-värdet för nollhypotesen att E-modulen är oförändrad.

På de sträckor där E-modulen i stort sett är oförändrad finns naturligtvis en hög positiv korrelation (runt 0,7) mellan E-modulen före, respektive efter åtgärd, men korrelationen är lägre där E-modulen ökat (ca 0,3). Nivån för E-modulen varierar längs provvägarnas sträckning, vilket tillsammans med de tidigare nämnda observationerna antyder att terrassens/undergrundens egenskaper och reaktion på packningsinsatserna är det som huvudsakligen styr den observerade E-modulen.

En intressant fråga är huruvida vägens E-modul *före* åtgärd (E<sub>0</sub>) korrelerar med det uppnådda resultatet i termer av CBR-värdet. Man skulle kunna tänka sig att en mindre eftergivlig undergrund ger bättre förutsättningar för en lyckad packningsinsats av grus/asklagret. Resultaten från Tabell 5 ger inte stöd för en sådan hypotes med två undantag: för referenssträckan tycks en negativ korrelation föreligga, men antalet mätpunkter är som nämnt litet och den statistiska säkerheten låg. För infräsningen på testväg 1 (sträcka 1), där datamängden är större, föreligger däremot en ganska kraftig positiv korrelation. En skillnad mellan den sträckan och andra sträckor är de – speciellt för sträckans första halva - mycket höga E-moduler som observerades både före och efter åtgärd. Ett icke-linjärt samband mellan terrassens elasticitet och packningseffekten på erhållna CBR-värden hos grus/asklagret skulle kunna förklara sambandet, och understryka vikten av adekvat kompaktering av terrassen. Som allmänt råd är terrasskompaktering okontroversiellt, men ytterligare studier är nödvändiga för att bekräfta och kvantifiera hypotesen om effekten på bärlagret.

## ARBETSPROCESSERNAS BETYDELSE FÖR HÅLLFASTHETEN

Det är ofrånkomligt att den faktiska tjockleken på bärlagret efter kompaktering varierar. Medelvärdet för de sträckor som belades med en nominellt 200 mm tjock och på förhand preparerad blandning (bara grus eller grus/aska blandat i krossverket eller med blandningskopa) är dock på någon millimeter när det samma – 170 mm (Tabell 4). På de sträckor där blandningen preparerades på väg med väghyvel eller fräs blev grus/asklagret

tunnare och i medeltal kring 120 mm. Fräsens benägenhet att dra med sig större stenar från terrassmaterialet begränsade infräsningsdjupet, och väghyveln är i sig inte ett idealiskt blandningsredskap. En jämförelse med rekommendationerna för tillredning av betong kan göras. Härvidlag gäller ganska precisa föreskrifter beträffande vattenmängd, blandningstid och fuktförhållanden under härdningsförloppet. Rekommenderad blandningstid i tombola är för vanliga betongsorter 5–10 min. Tiden är satt med avseende på erhållande av maximal styrka och med marginal för att säkerställa ett homogent resultat, men det är ofrånkomligt att några av de blandningstekniker som undersökts i detta projekt inte kan komma i närheten av den kontroll man har ens vid en kort tombolablandning. Exakt vilka vinster en förbättrad blandning skulle medföra har inte studerats i detta projekt, som utgått ifrån normalt tillgänglig utrustning, men skulle vara intressant för vidare undersökningar. Studien har konstaterat avsevärda lokala variationer för hårdheten hos det brunna bärlagret. En huvudanledning till variationen är sannolikt svårigheter att uppnå homogen blandning och lagom bevattning. Problem med att hålla bärlagret fuktigt under härdningen har däremot sannolikt varit av underordnad betydelse, eftersom resultatet varierar utmed en längdskala där eventuella uttorkningsprocesser i praktiken är konstanta. Detta betyder dock inte att frågan om uttorkning är oviktig för det erhållna resultatets medelhårdhet och risken för uppkomst av torksprickor i bärlagret.

Ett resonemang liknande det om homogeniteten kan föras beträffande möjligheten att färdigställa en vägsektion tillräckligt snabbt efter bevattning, så att materialet inte hinner härda före kompaktering. Variationen är stor även mellan punkter som rimligen behandlats på samma sätt och i stort sett samtidigt. Det kan dock inte uteslutas att skillnaderna i medelhårdhet mellan olika vägsektioner kan hänföras till olika tidsspann mellan första kontakt med vatten och färdigställd kompaktering av vägen.

Om bärlagret läggs ut i två omgångar kommer det undre lagret att utsättas för kompaktering i två omgångar. Effekten av den andra kompakteringen på det undre lagret kan diskuteras. Har härdning hunnit ske som avsetts bör effekten vara ringa i och med den stora strukturabilitet som erhålls. En betraktelse av testväg 1, sträcka 2, ger delvis stöd för hypotesen; Hårdheten stiger i medeltal från ytan och ned till ett djup av ca 70 mm, varefter den är konstant genom resten av bärlagret. Skulle härdningen däremot av något skäl (otillräcklig bevattning, uttorkning eller för låg arbetstemperatur) endast ha skett partiellt är det troligt att kompakteringen av det övre lagret får en negativ inverkan på det undre lagrets hållfasthet. Hårdhetsprofilerna från testväg 2, sträcka 1, tycks visa på detta, men anledningen till det undre lagrets dåliga härdning här är sannolikt stor spårbildning och därmed följande inblandning av material från undergrunden som uppstod här. Skulle slutligen det undre lagret i praktiken inte ens ha börjat härda vid tidpunkten för den andra, bör den andra kompakteringen ha en positiv inverkan på det undre lagret. En så fördröjd härdning beror emellertid på en mycket låg arbetstemperatur (eventuellt med risk för frost) eller att askan helt enkelt är defekt och saknar reaktivitet.

En oundviklig fråga är hur det askförstärkta bärlagrets hållfasthet påverkas av att vattnet tillsätts *efter* att materialet lagts ut på vägen. Den normala proceduren för betongblandning är att vattnet tillsätts tidigt i processen och medverkar till att sprida finare partiklar jämnt i blandningen. På marknaden finns betongprodukter avsedda för vattentillsättning efteråt, så kallad torrbetong, men det är inte känt om ask-grusblandningens egenskaper skulle förändras påtagligt genom våtblandning. I Bohnhoff m.fl (2003) undersöktes hållfastheten hos en betong med portlandcement bevattnad *in situ*. Resultaten visade att en

hållfasthet jämförbar med traditionellt blandad betong kan uppnås, förutsatt att homogen och väl graderad blandning upprätthålls under arbetet. Det är sannolikt att blandning av aska och grus med vatten tillsatt skulle kunna förbättra blandningen och minska problemen med damm under arbetet. Det återstår att undersöka om en vattenmängd som förbättrar blandningen är kompatibel med processen för beläggning på väg.

De hållfasthetsvinster som observerats för projektets mest effektiva blandningsmetoder är i överensstämmelse med vad som setts i andra försök med flygaskförstärkning av vägmaterial. Šķēls m.fl. (2016) noterade en ökning av CBR från 10–15 för ren sand till 45–50 vid 20 procents askinblandning.

# Prestationsmodeller för anläggning eller upprustning av vägar med aska

Följande kapitel innehåller förslag till arbetsgång och en detaljerad kalkylmodell för tidsåtgången. Härledningarna kan hoppas över av den som inte är detaljintresserad och den fallstudie som avslutar kapitlet kan användas för att ge en grov jämförelse av tidsåtgången och kostnaden för de respektive metoderna.

Varje anläggningsprojekt måste planeras utifrån det aktuella objektets egenskaper, varvid ett antal logistiska val behöver göras. Det är knappast möjligt att skapa en prestationsmodell som täcker alla tänkbara situationer. Den modell som presenteras i det följande gäller för anläggningar vars egenskaper (sträckor, överbyggnadsmängd och så vidare) liknar dem för projektets testvägar. Modellens ingående maskinberoende parametrar, såsom framryckningshastighet och lastkapacitet, har hämtats från tidsstudier gjorda under projektet. Prestationsmodellen för hela projektet avser ett arbetssätt som författarna rekommenderar baserat på erfarenheterna från projektet.

Det typiska objektet, för vilket modellen ska gälla, består av en vägsektion av några kilometers längd, som ska beläggas med en askförstärkt överbyggnad. Längs vägen finns ett antal vändplatser utplacerade, med ett inbördes avstånd på någon kilometer. Det finns även mötesmöjligheter längs vägen med ett avstånd på några hundra meter. Från tåkten/lagret leder en framkörningssträcka på ett antal kilometer till början av anläggningen. Om ett objekt avviker väsentligt från testvägarna – det kan exempelvis röra sig om att avståndet är mycket längre eller kortare, eller att vägen består av flera grenar – kan prestationsmodellen ändå vara giltig, men projektören måste ta ställning till om resultaten är rimliga med hänsyn till omständigheterna. Om så inte är fallet måste projekteringen göras om från början och en ny prestationsmodell skapas. Tankesättet och grundkomponenterna för den senare kan dock hämtas från modellen nedan.

## Rekommenderad arbetsgång

Projektet inleds med att en lämplig mängd askblandning (överbyggnadsmaterial) tillreds och lagras skyddat från regn. Alternativt kan tillredningen ske parallellt med utläggningsarbetet, under förutsättning att tillräcklig tillredningstakt kan hållas. Nästa steg är att transportera ut materialet på vägen under en dag. Om befintlig väg är tillräckligt stark bör byggnationen ske med början längst bort från tåkten för att undvika onödig trafik på den torra askblandningen och senare askblandningen under härdning. Hänsyn till väderlek styr hur lång sträcka som kan prepareras. Ett regnväder får askblandningen att börja brinna för tidigt, med nedsatt hållfasthet i överbyggnaden som följd. När utläggningen är klar behöver lastfordonen inte längre tas i anspråk. Det tredje steget består i att under ett antal överfarer vattna och blanda materialet på den preparerade vägen. Detta sker sektionvis med hjälp av vattenbil och väghyvel, återigen med början längst bort från tåkten. Även här är väderleksförhållanden styrande för arbetet. Det fjärde och avslutande steget, vilket sker i omedelbar anslutning till det föregående, består i att med vibrovält överfara sträckan under arbete för att få den så kompakt som möjligt. Därefter bör vägsektionen inte trafikeras under härdningsfasen på ett antal dagar. Under vältning av en sektion kan bevattning och hyvling av nästa sektion inledas.

Upplägget som beskrivs nedan är till stor del inriktat på att undvika interferens och störningar mellan olika maskiner genom att på olika sätt hålla isär dem så långt som möjligt. Detta leder till att den totala projekttiden förmodligen blir längre än den skulle

kunna bli genom att i högre grad låta de olika arbetsstegen löpa parallellt. Dock minskar den föreslagna arbetsgången den totala maskintid som behöver tas i anspråk, och därmed maskinkostnaderna, genom att minimera riskerna för interferens och därmed följande väntetider.

Prestationsmodellerna för de olika stegen i vägbyggnadsprocessen är beroende av en rad olika parametrar. Representativa värden för dessa har tagits från arbetet med projektets teststräckor. I princip beräknas hur många lastcykler fordonen behöver utföra, och sedan multipliceras detta antal med lastcykeltiden för ett fordon. Vid planering av ett projekt bör man kontrollera att förutsättningarna för modellen är uppfyllda. En gnutta sunt förnuft är härvid nödvändig. Speciellt bör man ge akt på följande:

- De ingående parametrarna är inte kända exakt, utan måste i många fall uppskattas. Det är därvid viktigt att inte göra för optimistiska bedömningar. Överskattas exempelvis fordonens förflyttningshastighet leder det till stress i arbetet när förarna försöker hålla tidsschemat för att inte skapa köer.
- Varje fordon har en lastcykeltid, som är densamma som den tid det tar för fordonet att utföra ”ett varv” i arbetsprocessen. Divideras lastcykeltiden med antalet fordon som arbetar parallellt får man den tid som går mellan det att två fordon påbörjar ett visst moment i lastcykeln. Är denna tid större än arbetstiden för momentet, och detta inte kan utföras parallellt med påföljande moment uppstår en kö. Prestationsmodellen måste då anpassas för att ta hänsyn till väntetiden.

### **Några användbara råd**

Erfarenheterna från försöket ligger till grund för ett antal råd, som underlättar och effektiviserar anläggningsarbetet.

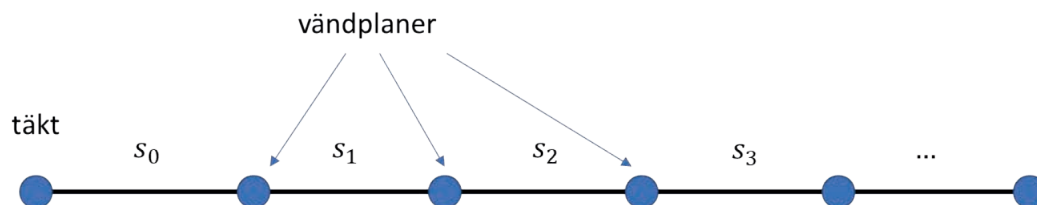
- Projekteringen inleds med en inventering av mötes- och vändmöjligheter. Sträckor mellan mötesplatser kan med fördel identifieras och märkas ut med käppar eller dylikt så att förarna lätt kan meddela varandra sin position.
- Vägen byggs, om bärigheten tillåter, inifrån för att minimera trafik på väg under arbete.
- Antalet lastfordon väljs så att ett helt antal vägsektioner kan behandlas under en 8-timmars arbetsdag. Dock bör inte antalet fordon vara större än vad tillrednings- och lastkapaciteten vid tåkten medger.
- Involverad personal tar raster och lunch samtidigt för att inte störa logistiken.
- Man bör inte förbereda längre sträckor än man anser sig kunna hantera med avseende på väderlek.
- Utlagd askblandning bör vattnas och packas samma dag.
- Utförsel av överbyggnadsmaterial bör ske med fordon som hålls isär. Gruppkörning leder till långa väntetider vid lastning och lossning och därmed sänkt utnyttjandegrad.

## UTLÄGGNING MED LASTBIL

Utläggningen av överbyggnadsmaterialet planeras så att materialet läggs ut längs hela anläggningens längd under en och samma dag. Arbetet utförs av ett antal lastfordon, som går i skytteltrafik mellan täkt och anläggning. Efter att ett fordon tömt sin last fortsätter det till nästa vändmöjlighet för att sedan återgå till täkten. Möten kan ske på mötesplatser eller vändplatser (Figur 26). Detta förutsätter någon form av kommunikationsmöjlighet mellan förarna, så att lämpligt fordon inväntar möte på närmaste mötesplats.

En standardrekommendation är att maskiner ska hållas så långt som möjligt från varandra för att minska risken att de stör varandra. Således borde exempelvis det andra fordonet i en grupp av två vänta med att påbörja sin första lastcykel (tur-returresa från täkt) tills det första fordonet fullbordat precis halva sin första lastcykel. (Används tre fordon väntar fordon två  $1/3$  lastcykel innan det börjar, och fordon tre väntar  $2/3$  lastcykel och så vidare) Det kommer emellertid i längden att vara svårt att upprätthålla exakt ett halvt varvs förskjutning mellan fordonen, då två förare inte kör exakt lika. Dessutom innebär det ingen total tidsförlust om fordon två påbörjar sin lastcykel omedelbart efter att det första fordonet lastats. Skulle ett fordon börja sacka efter, vilket märks antingen genom köbildning vid lastningen eller att tiden mellan två lastningar vid täkten ökar, kan vid möten prioritet ges till det fordon som ligger efter. En fördel med att lastning av två fordon sker vid näraliggande tillfällen är att lastningsmomentet då också utgör ett fordonsmöte, som kan ske utan tidsspillan.

För att minimera trafiken över det redan utlagda materialet med lastade fordon bör byggnationen om möjligt göras "inifrån" det vill säga inledas med den sektion som ligger längst från täkten. På så sätt minskar man dammbildning, kompaktering före bevattning samt påverkan på material som inte härdat än. Skulle vägens ursprungliga skick vara för dåligt kan det bli nödvändigt att bygga från andra hållet.



Figur 26. Schematisk bild av väg under åtgärd.

Tabell 6. Teckenförklaring för olika storheter för utforslingsprocessen.

Beteckning	Enhet	Betydelse	Värde/uttryck
<b>Vägtekniska data</b>			
$S$	m	Anlagda vägens total längd	$s_1 + s_2 + \dots$
$S_0$	m	Avstånd mellan bergtäkt och vägbyggnation	
$S_j, j = 1, 2, \dots$	m	Avstånd mellan vändmöjligheter	
$N_d$	-	Antal vändplatser längs vägen	
$\lambda_g$	ton m <sup>-1</sup>	Överbyggnadsmängd per längdenhet av vägen	1,15 ton/m (100 mm tjockt lager, 4 m vägbredd)
$M$	ton	Total mängd överbyggnadsblandning	
<b>Tekniska data för lastfordon</b>			
$q_g$	ton	Grusbilens lastkapacitet	29 ton
$N_b$	-	Antal lastfordon	2
$t_{loss}$	s	Tid för att tömma lastfordonet	35 s
$t_{last}$	s	Tid för att lasta lastfordonet	310 s
$t_{fbloss}$	s	Tid för att förbereda lastfordonet för lossning	70 s
$t_{fblast}$	s	Tid för att förbereda lastfordonet för lastning	20 s
$t_{vänd}$	s	Tid för att vända lastfordonet på vändplan	50 s
$a_a$	ms <sup>-2</sup>	Acceleration	
$a_b$	ms <sup>-2</sup>	Retardation	
$V_{gm}$	m s <sup>-1</sup>	Lastfordonens förflyttningshastighet	6,4 m/s
<b>Beräknade storheter</b>			
$t_0$	s	Tid för att köra mellan täkt och vägstart	$S_0/V_{gm}$
$t_{gk}$	s	Totalt tidstillägg för fasta moment under ett lastfordons lastcykel	
$t_m$	s	Genomsnittlig tidsspilla för ett fordons lastcykel p.g.a. fordonsmöten	
$t_{gcj}$	s	Lastcykeltid för lastfordon på delsträcka $j$	$t_{gk} + t_m (N_b - 1) + 2(s_1 + \dots + s_j)/V_m$
$N_{gcykj}$		Antalet nödvändiga lastcykler per fordon	$S_j \lambda_g / q_g N_b$
$t_j$	s	Tid för utläggning på delsträcka $j$	
$T_m$	s	Total tidsspilla p.g.a. fordonsmöten	
$T$	s	Total tid för insats	
$Q_j$	ton s <sup>-1</sup>	Utförelsekapacitet för alla lastfordon tillsammans på delsträcka $j$	
$Q_t$	ton s <sup>-1</sup>	Tillredningskapacitet vid kross eller motsvarande	



## Lastcykler

De moment som ingår i en lastcykel under utforslingen av askblandningen är huvudsakligen: lastning vid krossverk, färd fram till vägen under arbete, vidare transport ut längs vägen, lossning av askblandning, fortsatt färd till närmaste vändmöjlighet och retur till krossverket. Om förflyttningsmomenten antas ske med konstant marschfart tillkommer tillägg för accelerationer och retardationer i samband med start, lossning och vändning. Momenten tar samma tid oavsett processens framskridande och kan med beteckningar från Tabell 6 sammanfattas i en term

$$t_{gk} = t_{last} + 2t_0 + t_{loss} + t_{fblast} + t_{fbloss} + t_{vänd}. \quad (4)$$

För eventuella övriga tidstillägg orsakade av accelerationer och inbromsningar vid stopp gäller att

$$t_{acc} = \frac{v_{gm}}{2a_a}, t_{ret} = \frac{v_{gm}}{2a_b}.$$

Om en viss sträcka ska tillryggaläggas och marschfarten vid förflyttning är  $v_{gm}$  ska alltså  $t_{acc}$  och  $t_{ret}$  läggas till lastcykeltiden för ett fordon, för att kompensera för start och stopp. För en acceleration på 0,5 m/s<sup>2</sup> och framryckningshastigheten 6,4 m/s blir tillägget  $t_{acc}$  6,4 s.

En förutsättning här är att lastkapaciteten vid tåkten är så stor att ingen köbildning sker, utan lastning kan ske omedelbart efter lastfordonets ankomst.

Det totala antal lass som behöver läggas ut på en delsträcka  $j$  mellan två vändningsmöjligheter är  $S_j \lambda_g / q_g$ , och om  $N_b$  fordon används behöver gruppen av lastfordon utföra

$$N_{gcyk_j} = \lceil S_j \lambda_g / q_g N_b \rceil \approx S_j \lambda_g / q_g N_b \quad (5)$$

lastcykler. Uttrycket  $\lceil \cdot \rceil$  betyder avrundning uppåt till närmaste heltal. Vid anläggning av en viss sträcka är det troligt att antalet cykler för gruppen inte utgör ett heltal. Det kan exempelvis vara så att tre lastfordon vid anläggning av en sträcka på 500 m behöver genomföra 6,6 cykler, alltså föra ut  $3 \times 6,6 = 19,8$  lass. För att täcka behovet av överbyggnadsmaterial behöver därför två av fordonen köra 7 cykler medan ett fordon endast utför 6 cykler ( $7+7+6 = 20 > 19,8$ ). (Det sista av fordonen har då i princip 0,2 lass kvar efter att sträckan belagts, som lämpligen läggs ut på nästa sträcka.)

Under antagande att vändning sker i slutet av delsträckan, ges tidsåtgången  $t_j$  för utläggning av askblandning på delsträckan av

$$t_j = N_{gcyk_j} \left( t_{gk} + 2 \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_j}{v_m} \right) \approx \frac{S_j \lambda_g}{q_g N_b} \left( t_{gk} + 2 \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_j}{v_m} \right).$$

Hänsyn har inte tagits till att lastfordonen rycker fram en viss sträcka vid utläggningen av materialet. För en överbyggnadsmängd på 1 ton/m och en lastkapacitet på 30 ton innebär det 30 m, vilket motsvarar försumbara 5,4 s vid en marschfart på 20 km/h. Eftersom detta sker precis en gång per lastcykel kan, om så önskas, hänsyn tas till framryckningen genom att från  $t_k$  subtrahera tidsdifferensen  $q_g / \lambda_g v_m$ . Hänsyn har inte heller tagits till att fordonens arbetsfaser ligger något förskjutna till varandra och i princip börjar (och slutar) arbetet vid något olika tillfällen.

## Möten mellan lastfordon

Det har i det föregående antagits att  $N_b$  lastfordon kan arbeta ostört av varandra. På ett objekt som ligger långt från bergtåkten och där transporter övervägande sker på allmänna vägar, kan man ofta arrangera så att möten blir oproblematiske. En viktig faktor vid kortare transportavstånd är dock de väntetider som uppstår vid möten mellan fordon. Tidsåtgången för mötena kan vara svår att uppskatta på förhand, eftersom den är så beroende av hur logistiken kring utförelsen av materialet kan planeras och dirigeras. Under varje lastcykel möter ett fordon övriga  $N_b - 1$  fordon två gånger per tur. Ett av fordonen måste lämna plats åt det andra (Figur 27) och således måste varje fordon (i genomsnitt) lämna plats för möte  $N_b - 1$  gånger per lastcykel. Om varje möte medför en tidsspilla på i genomsnitt  $t_m$  sekunder, kan tiden för utläggningsmomentet på sträcka  $j$ , inklusive fördröjningar på grund av möten, beräknas som

$$t_j = N_{gcyk_j} \left( t_{gk} + 2 \frac{s_1 + s_2 + \dots + s_j}{v_m} + t_m (N_b - 1) \right). \quad (6)$$

Av arbetstiden för färdigställande av sträcka  $j$  utgörs alltså (ungefär)

$$t_{mj} = t_m \frac{s_j \lambda_g}{q_g N_b} (N_b - 1) = \frac{t_m s_j \lambda_g}{q_g} (1 - 1/N_b)$$

av mötestider. För utförelse av totalt  $M = s \lambda_g$  ton material för hela vägen utgörs därmed

$$T_m = \frac{t_m M}{q_g} (1 - 1/N_b) \quad (7)$$

av den totala arbetstiden av fördröjningar på grund av möten mellan lastfordonen.

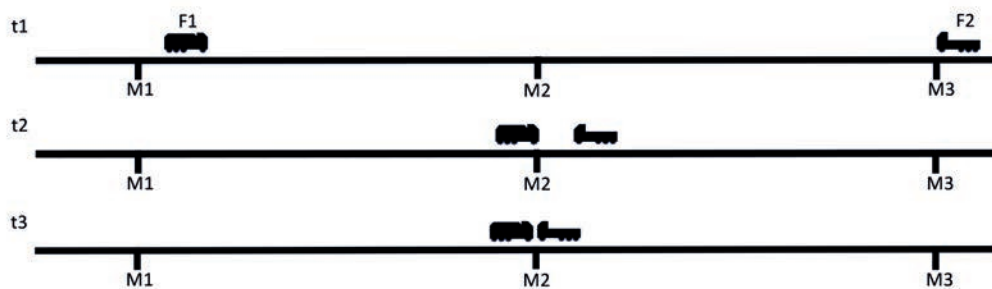
Tiden  $t_m$  ges, i de fall vägen är så bred att möte kan ske var som helst, av  $t_{acc} + t_{ret}$  med tillägg för stilleståndstiden under själva mötet. Om möte å andra sidan endast kan ske på vänd- eller mötesplatser, varierar väntetiden med var de mötande fordonen befinner sig.

Normalt vore det lämpligt att ett tomkörande fordon lämnar plats för ett lastat. Ett sådant förfarande kan rekommenderas om möten kan ske var som helst på vägen, men ställer stora krav på dirigering av trafiken om mötena endast kan ske på mötesplatser. En framförhållning inför möten motsvarande två vägsträckor mellan mötesmöjligheter är då nödvändig och dessutom kan väntetiden för ett fordon som inväntar möte bli lång.

Frågar man principen att olastat fordon alltid lämnar företräde räcker det med att varje fordonsförare alltid stannar på närmsta mötesplats om det finns ett fordon på efterföljande sträcka. I genomsnitt behöver ett fordon på sin väg från tåkten väja för de andra fordonen i 50 procent av fallen, det vill säga  $(N_b - 1)/2$  gånger. Väntetiden för ett stopp varierar mellan noll och den tid det tar för mötande fordon att tillryggalägga sträckan mellan mötesmöjligheterna. I genomsnitt är denna tid

$$t_m = s_d / 2v_m.$$

På väg tillbaka till tåkten sker möten enligt samma mönster. Den tid som ett fordon under en lastcykel ägnar åt väntetider är därför i genomsnitt  $S_d (N_b - 1) / 2v_{gm}$ .



Figur 27. Vid en viss tidpunkt t1 befinner sig fordon 1 strax efter M1. I samma ögonblick befinner sig fordon 2 med motsatt färdriktning vid M3. Båda fordonen fortsätter. F1 når M2 strax före F2 vid tidpunkt t2. F1 stannar och inväntar F2. Möte sker vid tidpunkt t3, varefter båda fordon fortsätter.

Om mötesmöjligheterna ligger på olika avstånd från varandra måste man försöka beräkna något sorts medelvärde, eftersom mötena kommer att ske på olika platser under arbetets gång. Som en konservativ skattning kan det längsta avståndet användas, vilket innebär att väntetiden i genomsnitt överskattas. Ett annat alternativ är att beräkna det aritmetiska medelvärdet av avstånden, men mera korrekt är att vikta avstånden efter hur stor andel de utgör av den totala sträckan. Skulle avstånden exempelvis vara 500 m samt 50 m är 275 m inget representativt medelvärde, då sannolikheten är mycket större att möte sker på den längre sträckan än på den kortare. I stället är värdet  $500 \times 500/550 + 50 \times 50/550 = 460$  [m] mera representativt.

*För att mötesstrategin ska fungera krävs att trafiken på något vis kan dirigeras så att det fordon som befinner sig närmast en plats där möte kan ske stannar och inväntar mötande fordon. Denna uppgift är den svåraste när det gäller arbetsledningen av utläggningsmomentet. Någon form av kommunikationsmöjligheter mellan fordonen och en eventuell arbetsledare är nödvändig. Applikationer för mobiltelefoner som via GPS-spårning kan visa andra enheters position, kan eventuellt vara till hjälp, förutsatt att tillräcklig täckning finns.*

Ett sätt att förenkla arbetsledningen och möteslogistiken är att låta lastfordonen gå tillsammans i grupp, men detta leder till långa väntetider. Varje fordon måste i så fall vänta in de andra både vid lastning och lossning. Detta innebär att tiden för dessa moment tillsammans ökar med  $(N_b - 1)(t_{fblast} + t_{last} + t_{f Bloss} + t_{loss})$  för varje lastcykel. Det ska ställas mot tidsvinsten på  $(N_b - 1)t_m$  som görs varje lastcykel i och med att möten längs väg inte behöver utföras. *I de flesta fall kommer detta inte att kompensera för de ökade väntetiderna. Den förenklade logistiken får ett högt pris i form av lägre utnyttjandegrad på lastfordonen.*

## Lastfordonens utförelsekapacitet i relation till tillredningskapaciteten

Den totala utförelsekapaciteten för lastfordonen varierar med projektets framskridande. På en delsträcka  $j$  är lastcykeltiden för ett fordon

$$t_{gc_j} = t_{gk} + t_m(N_b - 1) + 2js_d/v_m,$$

eller i det allmänna fallet

$$t_{gc_j} = t_{gk} + t_m(N_b - 1) + 2(s_1 + s_2 + \dots + s_j). \quad (9)$$

Alla  $N_b$  fordon, som vart och ett har lastkapaciteten  $q_g$ , kan därför tillsammans föra ut

$$Q_j = \frac{q_g N_b}{t_k + t_m(N_b - 1) + 2js_d/v_m}$$

materialmassa per tidsenhet. För att balans ska råda måste produktionen av askblandning minst motsvara  $Q_j$ . I det fall tillredningskapaciteten  $Q_t$  är begränsande blir tidsåtgången  $t_j$  för utläggning på sträcka  $j$

$$t_j = \frac{s_j \lambda_g}{Q_t}.$$

## Lastfordonens kapacitet i relation till lastkapaciteten vid täkten

För att lastningskapaciteten vid täkten inte ska bli begränsande krävs att  $t_{last} \leq q_g/Q_j$ . I annat fall kommer materialflödet  $q_g/t_{last}$  att diktera tidsåtgången  $t_j$  för utläggning på sträcka  $j$ , så att denna i stället blir

$$t_j = \frac{s_j \lambda_g t_{last}}{q_g}.$$

I det föregående har antagits att transportfordonen inte påverkar varandra, förutom eventuellt vid möten, och att fordonen i övrigt kan hålla tillräckligt avstånd från varandra. Skulle detta förhållande rubbas, kommer köer vid täkten att uppstå i lägen där materielbehovet ligger nära gränsen för lastkapaciteten. Till skillnad från vad som är fallet vid tillredningen kan ingen "buffert" av lastkapacitet byggas upp under vänteperioder vid täkten, då inget lastfordon är inne för lastning.

## Systemprestation för utläggningsmomentet

För att korrekt beskriva den totala tiden måste hänsyn tas till kapacitetsbegränsningarna i varje del av systemet tillredning-lastning-lossning. Utifrån de ovan beräknade prestationerna i de respektive leden kan tiden för utläggning på varje delsträcka  $j$  beräknas som

$$t_j = s_j \lambda_g \max \left( \frac{1}{Q_t}, \frac{t_{last}}{q_g}, \frac{1}{q_g N_b} \left( t_{gk} + t_m(N_b - 1) + 2 \frac{s_1 + s_2 + \dots + s_j}{v_m} \right) \right).$$

Valet av antalet transportfordon  $N_b$  måste göras utifrån ett totalekonomiskt övervägande och kan eventuellt variera under arbetets gång. I början av åtgärden, då lastfordonens körtider är korta, kan det alltså vara aktuellt att använda ett mindre antal lastfordon på grund av begränsningar i tillrednings- eller lastningskapaciteten.

## Om inverkan av avstånd mellan vändmöjligheter

Hur lång väg som ska anläggas och hur tätt vändmöjligheterna ligger påverkar starkt tidsåtgången. Om en total sträcka  $s$  ska beläggas och  $N_d$  vändplatser kan fördelas på lika inbördes avstånd  $S_d$  längs vägen, så att  $S_1 = S_2 = \dots = S_d = S/N_d$ , gäller för den totala tiden  $T = \sum_{j=1}^{N_d} T_d$  att

$$T = \sum_{j=1}^{N_d} \frac{S_d \lambda_g}{q_g N_b} \left( t_{gk} + 2 \frac{j S_d}{v_{gm}} \right) = \frac{S_d \lambda_g t_{gk}}{q_g N_b} N_d + 2 \frac{S_d^2 \lambda_g}{q_g N_b v_{gm}} \sum_{j=1}^{N_d} j.$$

Med  $S_d = S/N_d$  och uttrycket för den aritmetiska summan insatta erhålles slutligen

$$T = \frac{\lambda_g t_{gk}}{q_g N_b} s + \frac{\lambda_g}{q_g N_b v_{gm}} (1 + 1/N_d) s^2.$$

Uttryckets kvadratiska term motsvarar det välkända fenomenet att anläggningstiden ökar snabbt med den totala väglängden. Vidare kan anläggningstidens beroende av antalet vändplatser studeras. För vägar så långa att den första termen i uttrycket är relativt sett försumbar, skiljer anläggningstiden en faktor två för de två extremfallen ”vändmöjlighet i varje punkt” och ”en enda vändplan i slutet av vägen”.

## BEVATTNING, HYVLING OCH PACKNING

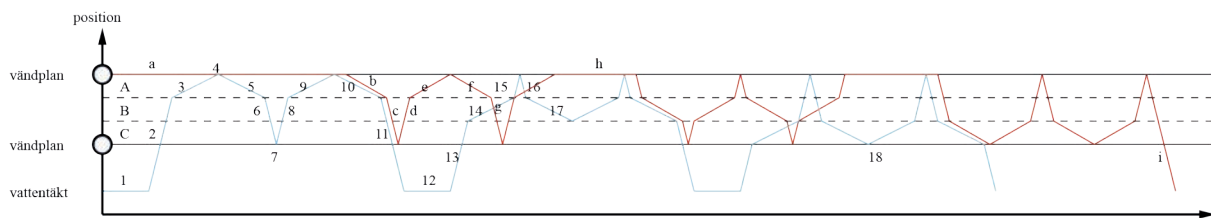
Processen att bevattna, hyvla och kompaktera det utlagda överbyggnadsmaterialet är det mest tidskritiska och logistiskt komplexa momentet i ett askförstärkningsprojekt, eftersom härdningsprocessen påbörjas så snart vattnet tillsätts. Som jämförelse kan nämnas att när en betongblandning tillretts måste den användas inom ett par timmar och öppettiden är kortare vid högre temperatur. Inga data om öppettiden för projektets aska finns, men man kan anta att ungefär samma tidsfönster som för betong gäller. Försökets testvägar vattnades, hyvlades och kompakterades inom ca en timme. Temperaturen var vid tillfället 22 °C. För att hålla sig till verifierade data rekommenderas därför att momentet bevattning-hyvling-kompaktering utförs på sektioner som inte är längre än att tiden mellan första kontakt med vatten och färdig kompaktering är runt en timme. Dessa sektioner utgör fraktioner av delsträckorna och benämns i det följande ”bitar”.

För att få en jämn härdning av askan är det av största vikt att det tillförda vattnet hinner sugas upp av materialet utan att rinna av samt att materialet får en homogen vattenhalt. För att undvika ytavrinning längs hjulspår och i backar rekommenderas att vattnet påförs i 8–10 omgångar, vilket innebär 4–5 tur- och returesor om bevattning sker i båda riktningar. En fördel med att vattna i båda riktningar är att det utjämnar effekten av eventuella flödesvariationer med vattennivån i tanken. Genom att låta väghyvel och vattenbil(ar) arbeta tillsammans och under ett antal överfarter blanda in vattnet i askblandningen säkerställs en god blandning. Med ett fixt vattenflöde från vattenbilen bestäms då framryckningshastigheten av flödet och antalet nödvändiga överfarter. Hastigheten kan dock aldrig vara större än vad som begränsas av väghyveln.

Detta innebär att processen att bevattna och hyvla den utlagda askblandningen måste följa ett annat logistiskt mönster än vid utläggningen av grusmaterialet. Vattenbilarna måste därvid under tömning av varje tank vatten köra ett antal vändor fram och tillbaka längs sträckan mellan två vändplatser. Vatten töms på en del (bit) av sträckan, vars längd motsvarar vattenbehovet enligt receptet.

En skillnad mellan grusfordon och vattenbilen är att den senare är försedd med pump och inte behöver assistans för sin fyllning. Det ger möjlighet för flera vattenbilar att fyllas parallellt, vilket är en stor fördel då tiden för att fylla vattenbilen typiskt är mer än tio minuter. En annan skillnad är som nämnt att bevattningen måste utföras i omgångar för att vattnet ska hinna sugas upp av materialet. Detta innebär att vattenbilen hinner rycka fram en avsevärd sträcka under själva tömningsförloppet. Dock är framryckningshastigheten under bevattning låg. Dessutom bör en vattenbil under bevattning alltid lämnas fri väg, då bevattningen kan vara svår att avbryta när den väl påbörjats, vilket potentiellt kan leda till långa väntetider inför möten.

Sammantaget gör detta att det är nödvändigt att arrangera så att vattenbilarna (om fler än en används) kan fyllas samtidigt och sedan får arbeta tillsammans. Då uppstår inga väntetider för möten och logistiken blir lättadministrerad. I princip kan man då behandla gruppen av vattenbilar som ett enda fordon med stor lastkapacitet. (Naturligtvis fungerar detta inte för hur många vattenbilar som helst, utan begränsas av hur lång fordonskolonn av vattenbilar som kan vända på vändplan och genomföra möten med väghyvel och vält.)



Figur 28. Körschema för vattenbil. Observera att avstånd och antal överfarter kan vara mindre än typiska värden i verkligheten. Positionen för gruppen vattenbil/väghyvel markeras med blått och vältens position med rött.

Figur 28 visar det principiella körschemat för vattenbilen och hyveln (blå linje) samt vältens (röd linje). Här ska en sträcka mellan två vändplaner bevattnas, hyvlas och kompakteras. Bevattningen ska ske i fyra omgångar, vilket innebär två varv med vattenbilen. På x-axeln är tiden markerad, och på y-axeln markeras vattenbilens position. Vid  $y = 0$  ligger vattentäkten. Från täkten leder en tillfartssträcka fram till den sträcka som är under arbete. Sträckan delas in i korta bitar A, B och C, separerade från varandra med streckade linjer. Dessa bitars längd är lika och valda så att vattnet i en tank enligt recept är lagom för att räckta till det utlagda överbyggnadsmaterialet. Innan bevattning inleds är det lämpligt att markera ut bitarna med markeringsfärg eller liknande. Tiden det tar att fylla tanken och vattna en bit av sträckan är vattenbilens lastcykeltid. Vid tiden noll befinner sig vattenbilen och väghyveln vid vattentäkten. Traktorn och vibrovältens befinner sig vid vägsträckans borte vändplan. Förloppet är sedan som följer:

1. Vattenbilen fylls.
2. Färd i marschfart fram till bit A.
3. Bevattning av A under låg framryckningshastighet. Väghyveln följer hela tiden den sista i gruppen av vattenbilar.
4. Vändning på vändplan.
5. Bevattning och hyvling åt motsatt håll tills början av A nåtts.
6. Färd i marschfart mot vändplan.
7. Vändning på vändplan.
8. Färd i marschfart åter mot A.
9. Bevattning och hyvling av A under låg framryckningshastighet följt av vändning på vändplan.
10. Bevattning och hyvling åt motsatt håll tills början av A nåtts. Samtidigt inleds arbetet att kompaktera sträcka A med vibrovält.
11. Färd i marschfart tillbaka till vattentäkten. Väghyveln vänder och inväntar på vändplan.
12. Vattenbilen fylls.
13. Färd i marschfart fram till bit B. Väghyveln följer.
14. B bevattnas och hyvlas fram till sitt slut.
15. Färd i marschfart mot vändplan följt av vändning.
16. Färd i marschfart mot B.
17. Bevattning och hyvling åt motsatt håll tills början av B nåtts. Därefter fortsätter processen att bevattna och hyvla B.
18. C bevattnas och hyvlas enligt samma mönster som A och B.

Traktorn med välten arbetar parallellt med vattenbilen och väghyveln enligt följande sekvens:

- a. Välten avvaktar vid bortre vändplan.
- b. Vältning #1 av ena sidan av A utförs.
- c. Färd i marschfart mot vändplan följt av vändning.
- d. Färd i marschfart mot A.
- e. Vältning #1 av andra sidan av A utförs.
- f. Vältning #2 av ena sidan av A utförs.
- g. Fordonsmöte varvid traktor med vält håller åt sidan och släpper fram vattenbilar och väghyvel.

Härefter fortsätter kompakteringen av bit A på samma sätt som ovan tills föreskrivet antal slag utförts.

- h. Välten avvaktar vid bortre vändplan.
- i. Återfärd efter avslutat arbete.

Tabell 7. Teckenförklaring för olika storheter för bevattnings-/hyvlingsprocessen

Beteckning	Enhet	Betydelse	Värde
$q_v$	ton	Vattenbilens lastkapacitet	10 ton
$N_{vb}$	-	Antal vattenbilar	
$\lambda_v$	ton m <sup>-1</sup>	Vattenmängd per längdenhet av vägen enligt recept	0,156 ton/m
$t_{vattna}$	s	Tid för att tömma vattenbilen	1172 s
$t_{fylla}$	s	Tid för att fylla vattenbilen	753 s
$t_{vända}$	s	Tid för att vända vält	27 s
$N_v$	-	Antal bevattningsomgångar för att vattnet ska hinna sugas upp	5 (bevattningen sker i båda riktningar)
$v_m$	m s <sup>-1</sup>	Vattenbilens förflyttningshastighet	6,4 m/s
$S_{0v}$	m	Avstånd mellan vattentäkt och vägstart	1650 m
$N_{vält}$	-	Antal slag med välten	3 (vältning sker en gång i vardera riktningen)
$v_{vält}$	m s <sup>-1</sup>	Vältens framryckningshastighet vid kompaktering	0,925 m/s
<b>Beräknade storheter</b>			
$v_{vattna}$	m s <sup>-1</sup>	Vattenbilens framryckningshastighet vid bevattning	$v_{vattna} = 2 \frac{q_v N_{vb} N_v}{t_{vattna} \lambda_v}$
$t_{kv}$	s	Totalt tidstillägg för fasta moment under vattenbilens lastcykel	2500 s
$S_v$	m	Sträcka som åt gången bevattnas, hyvlas och kompakteras	$q_v N_{vb} / \lambda_v$
$N_{vcyk_j}$	-	Antal nödvändiga lastcykler per fordon på delsträcka $j$	
$t_{vattencykel_j}$	s	Cykeltid för vattenbil på delsträcka $j$	
$t_{vältcykel_j}$	s	Cykeltid för traktor med vält på delsträcka $j$	
$t_{vatten_j}$		Tid för att vattna och hyvla delsträcka $j$	
$t_{vvp_j}$	s	Tid för att vattna och kompaktera delsträcka $j$	

Vattnet som tillsammans rymmer  $N_{vb}$  vattenbilar räcker till en sträcka på

$$S_v = q_v N_{vb} / \lambda_v. \quad (10)$$

Vidare är, analogt med ekvation (5), antalet lastcykler som gruppen av vattenbilar behöver utföra

$$N_{vcyk_j} = \lceil s_j \lambda_v / q_v N_{vb} \rceil \approx s_j \lambda_v / q_v N_{vb}. \quad (11)$$

Framryckningshastigheten under bevattning styrs i sin tur av  $\lambda_v$ ,  $t_{vattna}$ ,  $q_v$ ,  $N_{vb}$  och  $N_v$  (se Tabell 7 för teckenförklaring). Om varje bevattningsomgång utförs så att den bevattnade sträckan begjuts två gånger, en gång på väg från tälken och en gång på väg mot tälken, ges framryckningshastigheten av

$$v_{vattna} = 2 \frac{q_v N_{vb} N_v}{t_{vattna} \lambda_v}.$$



De fasta momenten per lastcykel består i den tid det tar att fylla och tömma tanken, tiden för att förflytta sig mellan vattentäkten och vägen samt tiden för att vända. Tiden för de fasta momenten ges totalt av

$$t_{kv} = t_{fylla} + t_{vattna} + \frac{2s_{0v}}{v_m} + 2t_{vända}.$$

Tiden det tar för att fullborda vattenbilens/väghyvelns lastcykel är

$$\begin{aligned} t_{vattencykel_j} &= t_{fylla} + \frac{2s_{0v}}{v_m} + 2N_v \frac{s_j - s_v}{v_m} + t_{vattna} + 2N_v t_{vända} \\ &= t_{fylla} + \frac{2s_{0v}}{v_m} + 2N_v \left( \frac{s_j - s_v}{v_m} + \frac{s_v}{v_{vattna}} + t_{vända} \right), \end{aligned}$$

vilket innebär att tiden det tar för vattning och hyvling av hela sträckan  $S_j$  är

$$t_{vatten_j} = N_{vcyk_j} \left( t_{fylla} + \frac{2s_{0v}}{v_m} + 2N_v \frac{s_j - s_v}{v_m} + t_{vattna} + 2N_v t_{vända} \right). \quad (12)$$

Uttrycket är något förenklat för den sista bevattningsvändan, som kan vara kortare än  $S_v$ . Dessutom finns det möjlighet att använda färre vattenbilar mot slutet. Vill man göra en noggrannare beräkning kan den sista bevattningsvändan behandlas separat (se fallstudien nedan).

Vibrovälten dras av en traktor och behöver packa vägen ett antal gånger. För att täcka vägbredden hos en normal skogsbilväg krävs två överfarter – en i vardera riktningen. Traktorn med välten utgör ett smidigare ekipage än ensemblen vattenbilar/vägvält och har lättare att anpassa sig till de andra fordonen vid möten. Därför kan packningen på en vägbit inledas så snart bevattningen av den senare är klar, för att sedan fortsätta medan vattenbilarna fylls och även sedan bevattning av nästa bit påbörjats. I detta senare skede av packningen kommer mötessituationer att uppstå, varvid traktorn alltså normalt lämnar väg för de andra fordonen. Den tid det tar för traktorn med vält att från sin utgångsposition välta vägbiten föreskrivet antal gånger och återgå till utgångspositionen är vältens cykeltid. För cykeltiden gäller

$$t_{vältcykel_j} = 2N_{vält} \left( \frac{s_j - s_v}{v_m} + \frac{s_v}{v_{vält}} + t_{vända} \right).$$

Till detta kommer väntetider vid möten, om cykeltiden är så lång att vattenbilen hinner tillbaka innan packningen är klar. En förutsättning är att  $T_{vältcykel} < T_{vattencykel}$ . Skulle packningen ta längre tid än bevattning/hyvling av en bit, måste vattenbilen och väghyveln invänta att packningen blir klar, med stilleståndstid för flera maskiner. Fortsätter bevattningen trots att packningen på föregående bit inte är klar blir konsekvensen att traktorn med välten kommer längre och längre efter i processen. Detta leder inte bara till logistisk oreda, utan får i längden till följd att packningen inte blir klar innan överbyggnadsmaterialet börjar härda.

Man måste även verifiera att tiden från första kontakt med vatten tills packningen är avslutad,  $t_{vattencykel_j} + t_{vältcykel_j} - t_{fylla}$ , är mindre än två timmar.

Eftersom packning och vattning sker parallellt, men med en tidsförskjutning på ca  $t_{vattencykel_j}$ , kan totaltiden för momentet bevattning-vältning-packning på hela sträckan  $j$  beräknas som

$$t_{VVP_j} = t_{vatten_j} + t_{vältcykel_j}$$

Totaltiden för att vattna och kompaktera alla delsträckor på vägen fås genom att summera bidragen från varje delsträcka. Insatsen är dock krävande och ett rimligt beting för en dag är sannolikt i de flesta fall en sådan delsträcka.

## EN FALLSTUDIE: TIDSÅTGÅNG FÖR UTFORSLING AV ÖVERBYGGNADSMATERIAL SAMT VATTNING, HYVLING OCH KOMPakterING AV EN 1050 M LÅNG STRÄCKA

I detta exempel beräknas tiden det tar att belägga en 1050 m lång vägsektion med ett 100 mm tjockt bärlager av askblandning. Tjockleken motsvarar vad som utifrån erfarenheterna från testvägarna är lämpligt att hantera i taget. För att uppnå ett tjockare lager krävs att proceduren upprepas. Fallstudien omfattar de mest komplexa och gemensamma momenten i de undersökta metoderna för askförstärkning, nämligen utforsling samt bevattning, hyvling och kompaktering.

### Objektet

Vägsektionen är placerad med sin början 2500 m från en bergtäkt, där också upplag för askblandat överbyggnadsmaterial kan anordnas. Sträckan består av en enda sektion och avslutas med en vändplan. Längs sträckan finns mötesplatser med inbördes avstånd på 360 m och 540 m. På sträckan mellan bergtäkt och väg finns mötesplatser med inbördes avstånd på 490 m, 530 m, 360 m, 450 m, 300 m och 270 m. Ett 100 mm tjockt lager överbyggnadsmaterial kräver 1,15 ton material/m, varav 0,23 ton/m utgörs av aska. Totalt innebär detta att  $1050 \times 1,15 = 1207$  ton material (varav 241 ton aska) ska föras ut på vägen, motsvarande  $1050 \times 1,15/29 = 41,6 < 42$  lass. Om tre lastfordon används betyder det  $N_{gcyk} = 14$  lastcykler/fordon, och alla tre fordon måste utföra sina 14 cykler.

De parametervärden som används i kalkylen är tagna från tidsstudier gjorda under projektet. I några fall påverkades värdena ganska mycket av omständigheter relaterade till projektet som försök. Dessa värden utgör därmed försiktiga uppskattningar jämfört med vad som är att vänta i en produktionssituation. Således har exempelvis samtliga maskiners förflyttnings- och transporthastighet satts till 6,4 m/s (23 km/h), vilket oftast är lägre än vad som kan uppnås i praktiken.

### Krossverk

Krossverket har vid ren krossning av berg en kapacitet på 220 ton/h. Sker samtidig krossning av berg och inblandning med aska är prestationen 179 ton/h färdig blandning. Värdena är medelvärden för en dags produktion, men krossverkets tekniska funktion gör att variationerna mellan olika timmar är små.

### Blandningsskopa

Blandningsskopa har en tillredningskapacitet på 102 ton/h. Värdet är ett medelvärde för en dags produktion, men variation mellan olika tidpunkter förekommer.

## Utforsling av material

Till att börja med beräknar vi tiden för fasta moment under ett lastfordons lastcykel. Denna är enligt ekvation (4) och med värden från tabell 8,

$$t_{gk} = 310 + 2 \times \frac{2500}{6,4} + 35 + 70 + 20 + 50 = 1266 \text{ [s]}.$$

Som genomsnittligt avstånd mellan mötesplatserna används 410 m. Den genomsnittliga väntetiden för ett möte blir då enligt ekvation (8)  $t_m = 410/(2 \times 6,4) = 32 \text{ [s]}$ . Antag att  $N_b = 3$  lastfordon används. Varje lastcykel fördröjs därmed  $32 \times (3 - 1) = 64 \text{ [s]}$  på grund av möten.

Nästa steg är att beräkna lastcykeltiden för ett fordon och jämföra den med lastkapaciteten vid tåkten. Lastcykeltiden blir enligt ekvation (9)  $1266 + 2 \times \frac{1050}{6,4} + 32 \times (3-1) = 1658 \text{ [s]}$ . Med tre lastfordon innebär detta att ett fordon inkommer för lastning var 553:e sekund ( $1658/3$ ), alltså drygt var 9:e minut. Detta är med ganska god marginal längre än lastningstiden på 310 s.

Den totala tidsåtgången för utläggningsmomentet beräknas enligt ekvation (6) till

$$t_1 = 14 \times \left( 1266 + 2 \times \frac{1050}{6,4} + 32 \times (3 - 1) \right) = 23\,213 \text{ [s]},$$

eller ca 6 timmar och 30 minuter. Detta är ett rimligt beting för en arbetsdag och lämnar tid för raster och lunch.

Tidsspillan på grund av möten ansvarar enligt ekvation (7) totalt för ca

$$T_m = \frac{32 \times 1050 \times 1,15}{29} \times (1 - 1/3) = 888 \text{ [s]}.$$

Dessa 888 s, eller 15 minuter, utgör alltså en förhållandevis liten andel av den totala arbetstiden. Möjligen är 32 s en underskattning av tiden varje möte innebär, men även om den fördubblas står inte möten för mer än 30 minuter av arbetstiden.

Skulle fordonen gå i grupp och invänta varandras lastningar och lossningar ökar tiden för dessa moment med en faktor tre. Detta skulle innebära en ökning av lastcykeltiden med ca  $2 \times (20+310+70+35) = 870 \text{ [s]}$ . För 14 lastcykler blir den totala extra tiden  $14 \times 870 = 12\,180 \text{ [s]}$  (3 timmar och 20 minuter), vilket inte på långt när kompenseras av den besparing på ca 15 minuter som undvikande av möten medför.

Med endast två lastfordon blir den totala tiden på samma sätt ca 9 timmar och 30 minuter, exklusive raster och lunch. Används i stället fyra lastfordon blir den totala tiden 4 timmar och 50 minuter. Med en lastcykeltid på 1690 s inkommer ett fordon för lastning var 422:a sekund. Detta lämnar fortfarande viss marginal till lastningstiden på 310 s, men systemet blir känsligt för störningar.

## Vattning och hyvling

Nästa steg i processen är att vattna och hyvla överbyggnadsmaterialet. Enligt recept behövs 0,156 ton vatten per meter väg. Med två vattenbilar ger detta enligt ekvation (10) att en bit om

$$s_v = \frac{10 \times 2}{0,156} = 128 \text{ [m]}$$

i taget kan bevattnas, hyvlas och packas. Totalt krävs 164 ton vatten för den 1050 m långa sträckan. Detta innebär  $164/10 = 16,4$  tankar vatten. Två vattenbilar kan då köra 8 vändor tillsammans, vilket lämnar en liten bit kvar att bevattna. Denna bit som blir kvar har längden  $1050 - 8 \times 128 = 26$  [m], och för den räcker det att en vattenbil engageras. Framryckningshastigheten vid bevattning ges av

$$v_{vattna} = 2 \frac{10 \times 2}{1172 \times 0,156} = 1,1 \text{ [m/s]}.$$

Tiden för att vattna och hyvla sträckan ges enklast av ekvation (12), men en beräkning som tar hänsyn till den förkortade sista bevattningsvändan ges i det följande; Vattenbilarnas lastcykeltid blir

$$t_{vattencykel_1} = 753 + \frac{2 \times 1650}{6,4} + 2 \times 5 \times \left( \frac{1050 - 128}{6,4} + \frac{128}{1,1} + 27 \right) = 4150 \text{ [s]}.$$

För de sista 26 m av sträckan måste vattenbilen, om endast en används, rycka fram hälften så fort, det vill säga 0,55 m/s. Tiden för att färdigställa den biten blir

$$t_{vattencykel_{sista}} = 753 + \frac{2 \times 1650}{6,4} + 2 \times 5 \times \left( \frac{1050 - 26}{6,4} + \frac{26}{0,55} + 27 \right) = 3610 \text{ [s]}.$$

Om två vattenbilar hade använts skulle tiden för de sista 26 m ha blivit 3375 s. Tiden kan kortas med några minuter om man utnyttjar att vattenbilarna inte behöver fyllas helt i sista vändan. Således tar bevattning och hyvling  $8 \times 4150 + 3610 = 36\ 810$  [s], om den ena vattenbilen bortrationaliseras sista bevattningsvändan, eller  $8 \times 4150 + 3375 = 36\ 575$  [s] om båda vattenbilar används även för sista vändan. (Ekvation (12), som inte tar hänsyn till möjligheten att minska fordonsantalet mot slutet och medför vissa avrundningseffekter, ger tiden  $9 \times 4150 = 37\ 350$  [s] vid avrundning uppåt av antalet lastcykler.)

### Kompaktering med vält

Cykeltiden för vältning beräknas till

$$t_{vältcykel_1} = 2 \times 3 \times \left( \frac{1050 - 128}{6,4} + \frac{128}{0,925} + 27 \right) = 1860 \text{ [s]},$$

vilket är mindre än vattenbilarnas cykeltid, men längre än fyllnadstiden, så viss interferens kommer att uppstå. Vi ser även att  $t_{vattencykel} + t_{vältcykel} - t_{fyll} = 4150 + 1860 - 753 = 5257$  [s]. Detta är inom det godkända tidsfönstret på ett par timmar.

Tiden för den sista vältcykeln kan beräknas till

$$t_{vältcykel_{sista}} = 2 \times 3 \times \left( \frac{1050 - 26}{6,4} + \frac{26}{0,925} + 27 \right) = 1290 \text{ [s]}.$$

Således tar hela bevattnings-, hyvlings- och kompakteringssteget

$$t_{VVP_1} = 8 \times 4150 + 3610 + 1290 = 38\ 100 \text{ [s]},$$

eller drygt 10 timmar och 30 minuter.

## Kostnadskalkylering

Detta kapitel redovisar den direkta kostnaden för att genomföra byggprojektet i exemplet ovan enligt de fem undersökta metoderna. Kalkylerna innefattar varken etableringskostnad för maskiner eller kostnaden för lagring av askan. Kostnaden för själva askan är en stor osäkerhetsfaktor. I nuläget är den negativ på grund av deponiskatten (514 kr/ton för 2019), men det är inte otroligt att askan kommer att betinga positivt värde i framtiden. Kostnaden för askan omfattas därför inte i kalkylerna. Inte heller har ett eventuellt slitlager tagits med i beräkningen. För utförande av försöksvägarna ställdes krav på ett slitlager som minskar uppkomsten av damm från askan. Vilka krav på slitlager som kommer att ställas om askförstärkta bärlager i framtiden blir vanliga är inte känt.

Tidsåtgången för de olika arbetsmomenten har tagits från exempelkalkylen, och utifrån tiderna och maskinernas respektive timkostnad har totalkostnaderna beräknats. Således tar kalkylen hänsyn till stilleståndstid, som de olika maskinerna har i varierande omfattning. Maskinernas timpris är representativa listpriser 2019 (Tabell 8).

## Löpande kostnader för använd utrustning inklusive operatör

Tabell 8. Kalkylpriser för maskinutrustning år 2019.

<b>Maskiner och timdebitering</b>	<b>Timpris (kr)</b>
Hjullastare L90	750
Lastbil med släp	1100
22-tons grävmaskin	900
Väghyvel	1050
Vattenbil	800
Traktor med vibrovält	700
Fräs	4000
Blandningsskopa	400
Flisbil	950
<b>Maskiner med prestationsbaserad debitering</b>	<b>Pris (kr/ton)</b>
Krossverk tillsammans med grävmaskin och hjullastare	42 kr/ton vid vanlig krossning 52 kr/ton vid askinblandning



Figur 29. Flödesscheman för de olika metoderna. Vissa av momenten är identiska eller skiljer bara i kvantitet. Processerna avser i samtliga fall utläggning av ett 100 mm tjockt bärlager på den 1050 m långa sträckan.

De olika konstruktionsmetoderna består av ett antal delmoment som utför i sekvens. Delmomenten är delvis gemensamma för de olika byggmetoderna. Processerna visas i Figur 29. Kostnaderna för de olika momenten beräknas i det följande.

### Framforsling av aska

Avståndet mellan Ortvikens och bergtälten är 29,3 km. Med en lastvikt på 43 ton krävdes 6 vändor för att få askan på plats. En genomsnittlig vändtid på 5107 s och en timkostnad för flisbilen på 950 kr ger kostnaden 8086 kr för att få askan till tälten.

### Krossning av 1207 ton berg

Med en produktionskostnad av 42 kr/ton står krossverket för en kostnad av 50 694 kr. Krossningen tar  $1207/220 = 5,5$  [h].

### Krossning av 966 ton berg

Här blir kostnaden för materialframställning 40 572 kr.

### Krossning och samtidig blandning av 1207 ton överbyggnadsmaterial

Produktionskostnaden för krossverket är 52 kr/ton, vilket ger en kostnad på 62 764 kr.

### Blandning med blandningsskopa monterad på grävmaskin

Blandningsskopan har en kapacitet på 102 ton/h. Detta ger en kostnad för momentet på  $\frac{1207}{102} \times (900 + 400) = 15\,383$  [kr].

### Utläggning av 1207 ton material

Ingen skillnad görs här på typ av eller antal material (rent grus, grus följt av aska eller askblandning), utan kalkylen betraktar bara utförelse av en given mängd material. För att nå en askinblandning på 20 procent ska vart femte lass överbyggnadsmaterial bestå av aska. Kostnaderna för momentet hänförs till lastfordonen samt hjullastaren. Används två bilar tar arbetet 9:30 timmar och kostnaden blir  $9.5 \times (1100 \times 2 + 750) = 28\,025$  [kr]. Tre bilar kan utföra arbetet på 6:30 timmar och kostnaden blir då  $6.5 \times (1100 \times 2 + 750) = 26\,325$  [kr].

### Kompaktering av 1050 m väg

Med sex överfarter och tid för vändningar tar kompakteringen  $6 \times \frac{1050}{0.925} + 5 \times 27 = 6946$  [s]. Kostnaden för momentet blir  $(6945/3600) \times 700 = 1350$  [kr].

### Hyvelblandning av 1050 m väg

Två överfarter av vägen tar  $2 \times 1050 / 1.0 = 2100$  [s]. Kostnaden för detta är  $1050 \times 2100 / 3600 = 612$  [kr].

### Bevattning, hyvling och kompaktering

Kalkylen utgår ifrån att två vattenbilar är engagerade under 8 körcykler om 4150 s, och att därefter en vattenbil är engagerad 3610 s. Traktorn med välten behöver egentligen inte påbörja sitt arbete förrän den första biten är bevattnad, men måste etablera sig på den bortre vändplanen innan bevattningen påbörjas. Det antas för enkelhets skull att traktorn är engagerad under hela bevattningsproceduren, samt den tid det krävs för att kompaktera den sista biten av vägsträckan. Kostnaden för vattenbilarna blir  $2 \times \frac{4150 \times 8}{3600} \times 800 + \frac{3610}{3600} \times 800 = 15\,558$  [kr]. Väghyveln används under hela bevattningsförloppet, vilket kostar  $\frac{4150 \times 8 + 3610}{3600} \times 1050 = 10\,736$  [kr]. Traktorn med välten kostar slutligen  $\frac{4150 \times 8 + 3610 + 1290}{3600} \times 700 = 7408$  [kr]. Totalkostnaden för momentet blir därmed 33 702 kr.

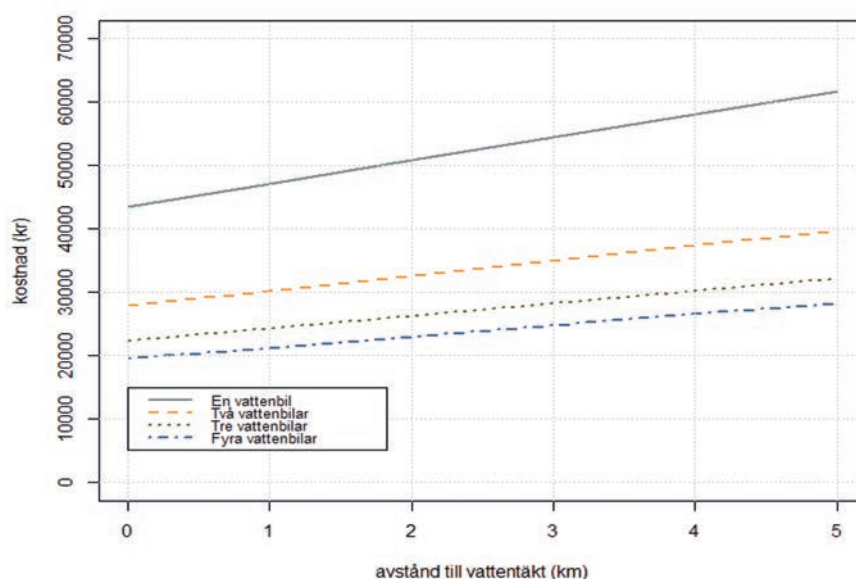
Totalkostnad för anläggandet av ett 100 mm tjockt bärlager på en 1050 m lång exempelväg enligt de olika metoderna presenteras i Tabell 9 i kostnadsordning.

Tabell 9. De olika metodernas löpande kostnader för anläggning av bärlagret på en 1050 m lång exempelväg.

Metod	Totalkostnad (kr)
Referenssträcka med vanligt grusbärlager	78 369
Blandning på väg med hyvel (metod 3)	109 297
Blandning på väg med fräs (metod 1)	112 385
Blandning med blandningsskopa (metod 4)	124 068
Blandning i krossverk (metod 2)	130 877

## Om inverkan av avståndet till vattentäkten och antalet vattenbilar

Kostnaden för momentet vattning-hyvling-kompaktering följer ett enkelt samband med avståndet till vattentäkten och antalet vattenbilar. Figuren visar hur kostnaden för momenten på exempelvägen ökar med avståndet och minskar med antalet använda bilar. Totalkostnaden sjunker eftersom bilarnas totala maskintid i stort sett är konstant, medan väghyvelns användningstid minskar. Antalet vattenbilar begränsas dock i praktiken av etableringskostnaden samt av den trängsel som uppstår om flera fordon används. Dessutom nås förr eller senare en gräns då vattenbilsgruppens framryckningshastighet blir större än hyvelns. Vad som är ett optimalt antal måste undersökas från fall till fall, men det är troligtvis sällan praktiskt att använda mer än tre fordon.



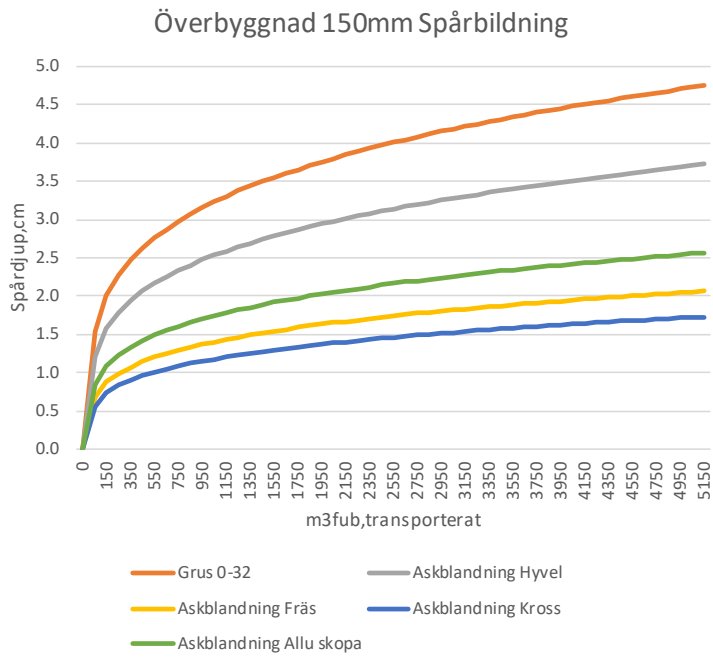
Figur 30. Samband mellan avstånd till vattentäkt och kostnad för momentet vattning-hyvling-kompaktering.

## JÄMFÖRELSE AV DE OLIKA BLANDNINGSTYPERNA ENLIGT STP-MODELLEN

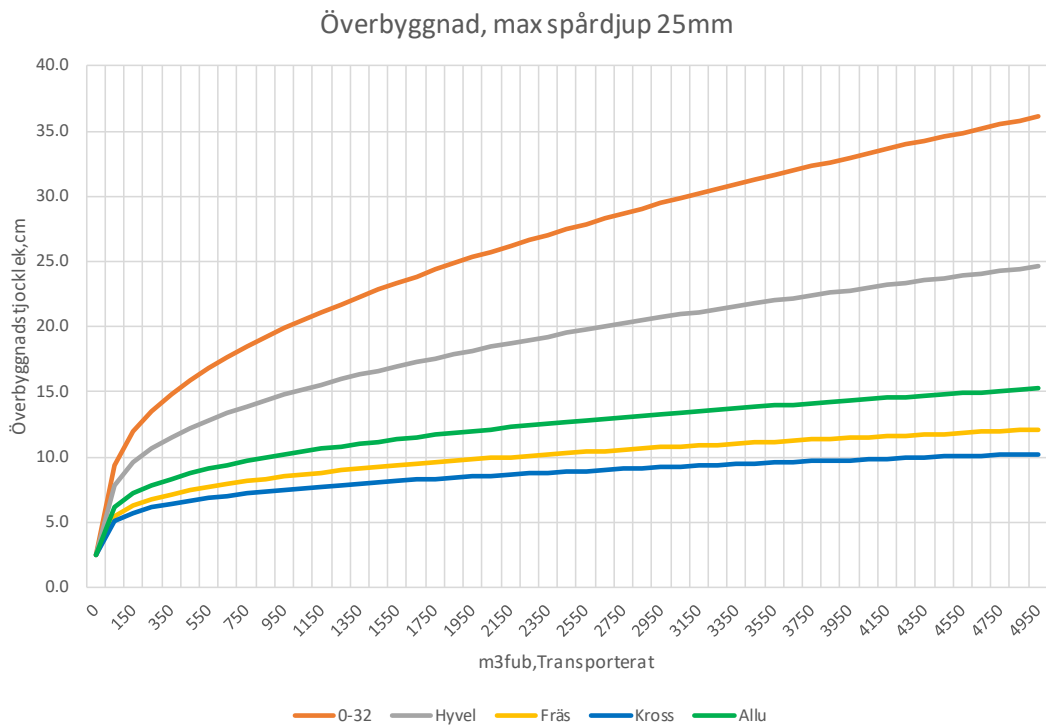
STP-modellen (Surface Thickness program) är en metod för att beräkna olika fordons spårbildning på vägar med olika egenskaper (Bergqvist m.fl., 2016). Modellen kan användas för att dimensionera överbyggnaden eller för att undersöka hur snabbt nedbrytning i form av spårbildning sker. I detta avsnitt undersöks spårdjupsbildning samt hur tjock överbyggnad som behövs för att uppnå en maximal spårbildning på 25 mm, då en vanlig fordonskombination används för att transportera ut olika virkesvolymmer.

Ingående parametrar:		Material	CBR
Fordon:	64 tons lastbil och släp med dubbelmontage	Terrassen	20
Maximal spårbildning:	25 mm	0–32 Grus	25
Överbyggnadstjocklek:	150 mm	Hyvelblandning1	31
		Fräsblandning	58
		Krossverksblandning	70
		Blandningsskopa	47





Figur 31. Spårbildning vid 150 mm överbyggnadstjocklek redovisad per utforslad m³ub.



Figur 31. Spårbildning vid 150 mm överbyggnadstjocklek redovisad per utforslad m³ub.

I Figur 31 visas hur spårdjupet utvecklas på en väg där ett 150 mm tjockt bärlager anlagts med de respektive metoderna i projektet. (Tjockleken motsvarar vad som i praktiken uppnåddes även om den nominella tjockleken var 200 mm.) Terrassens hårdhet sattes till CBR = 20, vilket är representativt för god moränmark. Ur figuren kan utläsas att spårbildningsdjupet för den tekniskt mest framgångsrika askförstärkningsmetoden (krossverksblandning) är ca 35 procent av den för referensvägen, för en given mängd utforslat virke. Betraktar man i stället den trafik som vägen tål innan ett bestämt spårdjup uppträder, finner man avsevärda skillnader mellan de olika bärlagren. 25 mm spårdjup uppnås exempelvis efter 350 m<sup>3</sup>fub på referensvägen, men inte förrän efter över 4500 m<sup>3</sup>fub på vägen där bärlagret anlagts med metod 4. Man bör ha i åtanke att noggranna värden på trafikmängden inte kan beräknas, eftersom kurvornas flackhet är känsliga för hårdhetsvariationer i materialet, vilket påverkar resultatet kraftigt. Resultaten bör därför tolkas med viss försiktighet. Kvalitativt tyder resultatet dock på att åtgärdsintervallen för de askförstärkta bärlagren bör kunna förlängas avsevärt, åtminstone med hänsyn till spårdjupsbildning.

Figur 32 visar vilken överbyggnadstjocklek som är nödvändig vid olika trafikmängder om spårdjupsutvecklingen ska begränsas till 25 mm. Kurvorna antyder att en väg som ska tåla en given trafik kan göras en tredjedel så tjock om krossverksblandningen används, jämfört med vanligt grus 0–32. Slutsatsen bör inte dras allt för långt, då STP-modellen inte är giltig för lager tunnare än 50 mm. Dessutom ställer tunna lager stora kvalitetskrav vid byggandet, då små absoluta avvikelser i tjockleken får stor betydelse. Vänder man på resonemanget och jämför bärlager byggda till samma tjocklek, men anlagda med olika metoder, finner man att livslängden räknat i trafik ökar snabbt med hårdheten på materialet.

# Slutsatser om askförstärkningens tekniska och ekonomiska resultat

Såväl det tekniska som ekonomiska resultatet varierade mellan de olika metoderna (Figur 33). Referensvägen med vanligt bergkross (0-32 mm) utgjorde ett bra jämförelseobjekt, då resultatet där var synnerligen gott och uppgradering till tillgänglighetsklass A uppnåddes. Blandning på väg med väghyvel var billigast och kan utföras med vanligen förekommande utrustning. Dock gav metoden ett svagt resultat och det är tveksamt om den blygsamma ökningen av hårdheten motiverar en kostnadsökning på över 20 procent.

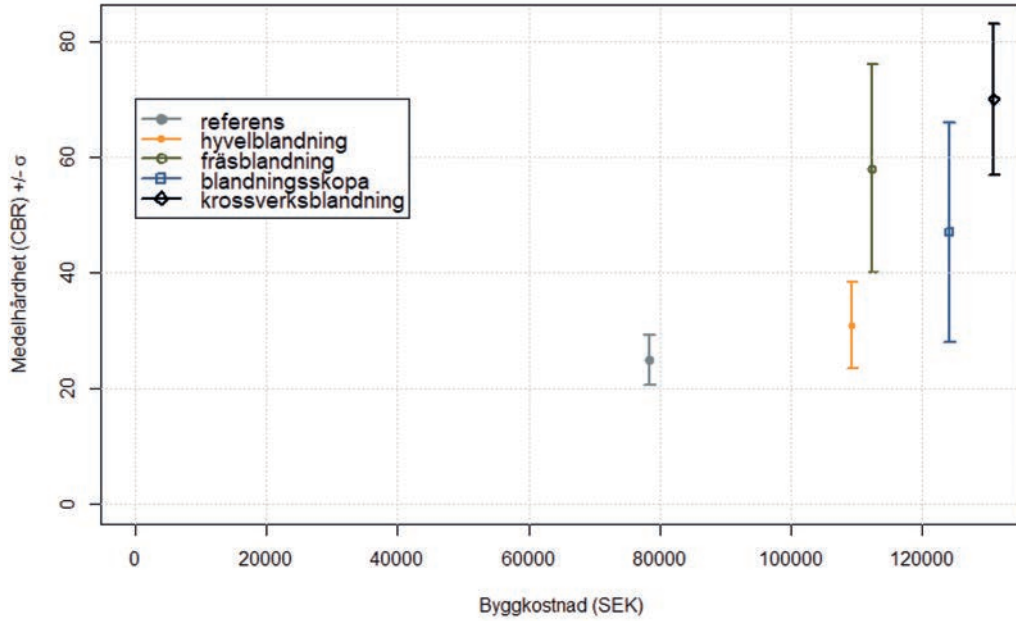
För fräsblandningen noterades en markant förhöjning av hårdheten, men med ganska stora variationer mellan olika mätpunkter. Kostnaden var marginellt högre än för blandning med hyvel, men stora osäkerheter föreligger kring tillgänglighet och etableringskostnad för maskiner av detta slag. Fräsen har hög kapacitet, och under förutsättning att terrassen inte innehåller stenar större än ca 150 mm, samt att bevattningsfrågan löses, skulle fräsblandning kunna vara ett alternativ vid större projekt.

Metoden att på förhand tillreda materialet med blandningsskopa ser i förstone både dyrare och sämre ut än för vägfräsen. Dock finns utrymme för kostnadsmässig rationalisering genom att montera blandningsskopa på en hjullastare. Med tanke på att grundförutsättningarna skiljer så mycket mellan vägsträckan där blandningsskopa användes och sträckorna för de andra metoderna är resultaten inte helt jämförbara. Finns det fog för hypotesen om ett ickeinjärt samband mellan ytmodul före åtgärd och resultatet av kompaktering är det sannolikt att utfallet för metoden med blandningsskopa varit både större och haft jämnare hårdhet. Vissa arbetsmiljöproblem relaterade till damning vid blandningen måste hanteras.

Störst höjning av bärlagrets hårdhet uppvisar krossverksblandningen, och med något mindre variation än för fräsen och blandningsskopa. Notabelt från mätserierna är att hårdheten, när den är som lägst, ändå är avsevärt högre än referenssträckans hårdaste punkter. Kostnadsdifferensen mot metoden med blandningsskopa kan härledas till den högre kostnaden för materialframställningen. Ett arbetsmiljöproblem med krossverksblandning, som måste lösas, är den kraftiga damningen. Materialet som kommer ut från krossen har större fallhöjd än när blandningsskopa användes. Detta ledde till särskilt kraftig dammbildning. Bevattning av materialet i krossen för att undvika damning är inte lämpligt då det leder till omfattande rengöringsarbeten av krossverket.

Vi har sett att resultaten för de metoder som ger bäst tekniskt resultat varierar ganska mycket och att hårdheten i de flesta fall inte uppvisar någon korrelation med ytmodulen före åtgärd. Detta antyder att orsaken till hårdhetsvariationerna ska sökas i andra faktorer, och understryker vikten av noggrannhet i portioneringen av grus och aska, samt att blandningen bearbetas tillräckligt för att den ska bli homogen. Bevattningen är ett kritiskt moment som kan misslyckas om förutsättningarna inte är de rätta. Efter att blandningen lagts ut på vägen, bevattnats och kompakterats är det viktigt att behandla den som betong under hårdande. Detta innebär skydd från uttorkning, frost och mekaniska påfrestningar under de första dygna. Det är av praktiska skäl knappast möjligt att anordna med täckning av en väg, men om insatsen kan planeras med hänsyn till väderförhållanden kan risken för uppkomst av frys- eller torksprickor minskas. Efterbevattning kan också komma ifråga, även om nyttan av densamma inte studerats i projektets försök.

Nytan med hållfasthetsvinsterna vid askförstärkning kan tas ut på olika vis. Man kan exempelvis bygga vägen för att tåla en given trafikmängd innan underhåll måste utföras, och därvid använda mindre överbyggnadsmaterial än om bara grus används. Alternativt kan man, givet en viss överbyggnadstjocklek, förlänga vägens livslängd. Frågan om vad som är bäst måste avgöras från fall till fall under betraktande av vägens användning ur ett ekonomiskt livscykelperspektiv. Hur underhåll av askvägar bäst utförs är en fråga som idag inte kan besvaras.



Figur 33. Medelhårdhet för de översta 150 mm av bärlagret samt standardavvikelse mot total byggkostnad för de olika byggmetoderna. Byggkostnaderna avser exemplet med en 1050 m lång väg. Om den totala väglängden är en annan kommer också kilometerkostnaden för vägen att förändras.

# Referenser

- ASTM D1883-99. 2003. Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08(1), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Bergman, R. & Suer, P. 2011. Säkra vägar i nytt klimat. Jämförande livscykelanalys mellan aska och grus i skogsbilväg. Statens geotekniska institut. ISSN 1100-6692.
- Bergqvist, M., Bradley, A., Björheden, R. & Eliasson, L. 2016. Validering av STP för svenska förhållanden. Arbetsrapport 920-2017.
- Bohnhoff, D. R., Hartjes, Z. D., Kammel, D. W., & Ryan, N. P. 2003. In-Situ Hydration of a Dry Concrete Mix. In 2003 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Bohrn, G. & Stampfer, K. 2014. Untreated wood ash as a structural stabilizing material in forest roads. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 35(1), 81-89.
- Kaakkurivaara, T., Kolisoja, P., Uusitalo, J., & Vuorimies, N. (2016). Fly ash in forest road rehabilitation. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 37(1), 119-130.
- Lahtinen, P. 2001. Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads. Helsinki University of Technology.
- Mácsik, J., Svedberg, B., Lenströmer, S. & Nilsson, T. 2004. Flygaska i geotekniska anläggningar Etapp 1: Inventering/Tillämplighet. Värmeforsk Rapport 870. ISSN 0282-3772.
- Mácsik, J., Erlandsson, Å. & Wexell, B. A. 2009. Flygaska–Grönlutslamstabiliserad skogsbilväg–Fallstudie Iggesund. Värmeforsk Rapport 1101. ISSN 1653-1248.
- Munde, H., Svedberg, B., Macsik, J., Maijala, A., Lahtinen, P., Ekdahl, P. & Néren, J. 2006. Flygaska i mark-och vägbyggnad. Grusvägar. Handbok. ISSN 0281-7578.
- Sarkkinen, M., Luukkonen, T. & Kemppainen, K. 2015. A wasterock and bioash mixture as a road stabilization product. Ur Selected papers from the 3rd Edition of the International Conference on Wastes: Solution, Treatments and Opportunities, Viana do Castelo (s. 283-288).
- Šķēls, P., Bondars, K., Plonis, R., Haritonovs, V. & Paeglītis, A. 2016. Usage of Wood Fly Ash in Stabilization of Unbound Pavement Layers and Soils. I Proceedings of 13th Baltic Sea Geotechnical Conference (s. 122-125).
- User guide to the dynamic cone penetrometer. 1996. Office of Minnesota Road Research.
- Vestin, J., Arm, M., Nordmark, D., Hallgren, P., Tiberg, C., Lagerkvist, A. & Lind, B. B. 2011. Effektivt askutnyttjande i vägar. Värmeforsk Rapport 1169. ISSN 1653-1248.
- Vestin, J., Nordmark, D., Arm, M., Lagerkvist, A. & Lind, B. B. 2016. Långtidsuppföljning av grusväg stabiliserad med bioflygaska – Sörkrångevägen. 2016. Energiforsk Rapport 2016:264. ISBN 978-91-7673-264-9.

# Bilaga 1. Tidsstudier

## TIDSSTUDIE KROSSVERK

Försöket med direkt inblandning av aska i krossverk utfördes den 25 juli 2018 i SCA:s täkt Fjäl i Timrå kommun. Vädret var klart och temperaturen var 30°C. Askan hade i förväg transporterats från Ortviken till täkten och var täckt med täckpapp för bio-bränsle. Berget i täkten var losshållet dagarna innan. Vid krossningen användes: kätkross (Sandvik UJ440I), konkross (Sandvik UH440I), sorteringsverk (Keetrack Explorer H6 Sorteringsverk), grävmaskin (Volvo EC380) för inlastning av material i krossen och hjullastare (Volvo L180 H) för internttransport av material.

Receptet för blandningen var för grävmaskinen att mata krossen med en skopa aska och två skopor berg. Materialet krossades ned till ett 0–30 material. Det färdiga materialet transporterades för att lagras i en tälthall som fanns att tillgå. Arbetet pågick i åtta timmar och totalt skapades 1433 ton ask-grusblandning som bestod av 297,3 ton aska och 1135 ton berg (inmätt på hjullastarens våg). Prestationen var alltså 179 ton/h vilket är en sänkning med ca 20 procent jämfört med vanlig krossning. Normal prestation vid krossning av 0–30 för detta system är ca 220 ton i timmen. För att hålla en hög kapacitet är det viktigt att allt är förberett och planerat.

### Mätningar av tidsåtgång för grävmaskinen

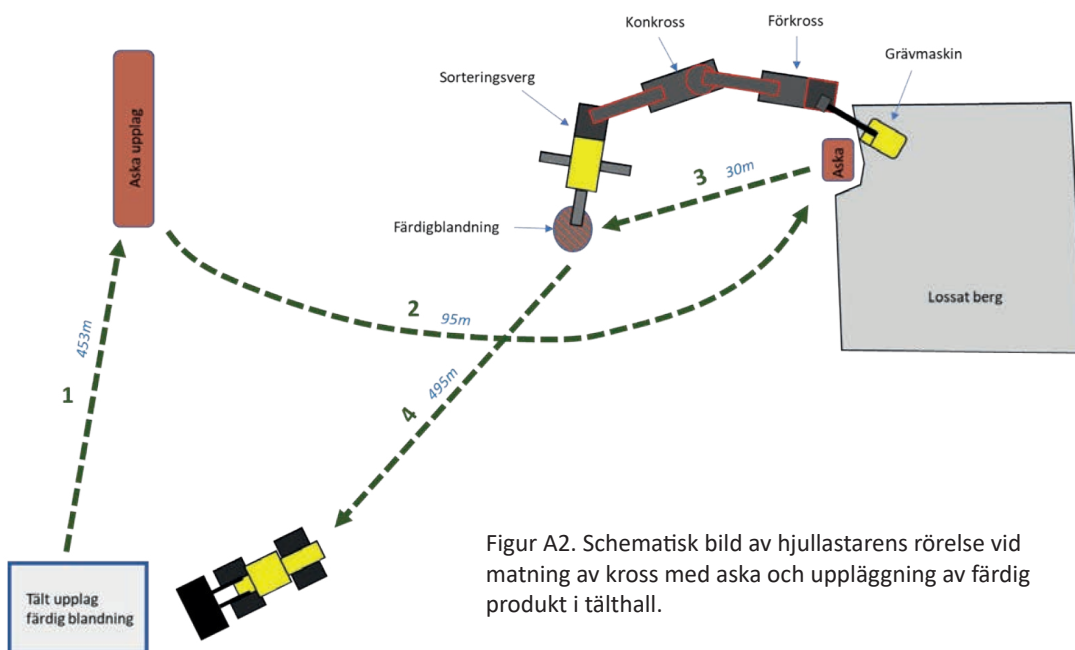
En mätning innebar en cykel där grävmaskinen startar med att tömma en skopa i krossen och slutar när den har lastat skopan och tömmer den igen. Fem mätningar utfördes den 25:e juli (klockan 06:30, 07:00, 08:00, 08.35 och 12:30). Totalt mättes 116 cykler med en tidsåtgång på i medeltal 37 sekunder (max. 148 s och min. 10 s). Grävmaskinen fick vänta på att konkrossen matade undan materialet innan förkrossen kunde fyllas på, vilket var ett problem. Grusmaterialet innehöll en hel del glimmer vilket gjorde att berget lätt smulades sönder.



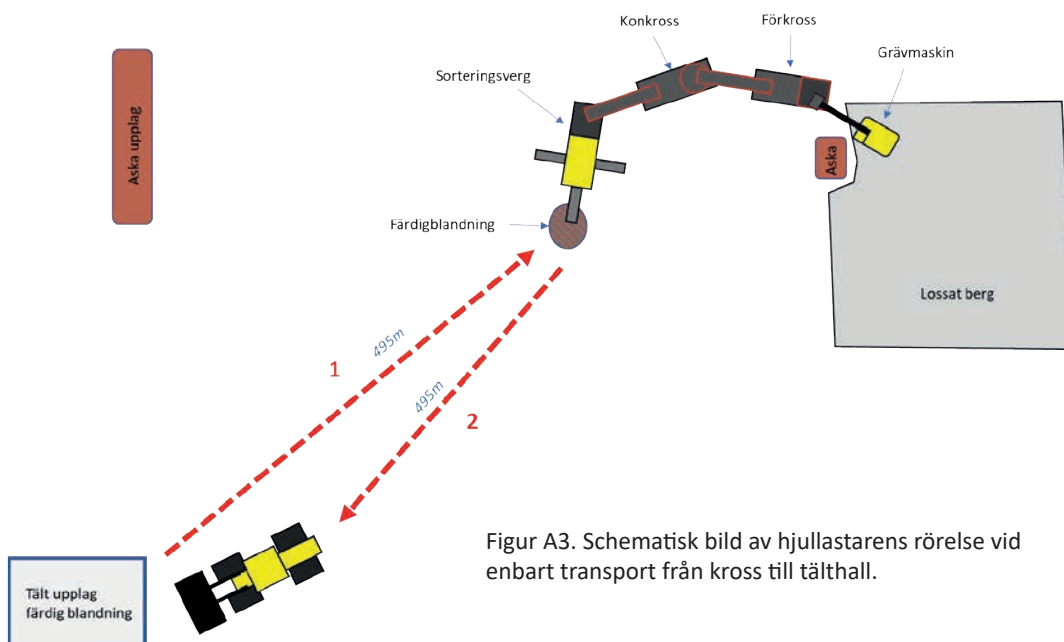
Figur A1. Uppställning vid inblandning av aska i krossverk.

## Tidsmätningar av hjullastaren

Mätningar av hjullastarens rörelser utfördes i två moment. Dessa beskrivs som grön och röd sträcka (se figur A2 och A3). Grön sträcka börjar när hjullastaren startar med tom skopa vid tälthallen och fortsätter med transport till askupplaget för att lasta en skopa aska som transporteras vidare till grävmaskinen. Hjullastaren flyttar sig från grävmaskinen till transportören vid sorteringsverket för att lasta en skopa färdig blandning som transporteras till tälthallen för lossning och stackning. Grön sträcka hade en längd på 1073 m och innehöll två lastningar och två lossningar (figur A2).



På röd sträcka startade hjullastaren med tom skopa vid tälthallen och transporterade sig till transportören vid sorteringsverket för att lasta en skopa färdigblandning, som i sin tur transporteras till tälthallen för lossning och stackning. Röd sträcka är 990 m med en lastning och en lossning (figur A3).





Figur A4. Stackning av krossblandning i tälthall. Allt rymdes inte, varpå delar av högen hamnade utanför tältet och täcktes med GROT-papp.

Tio mätningar utfördes, varav sju var på grön sträcka och tre på röd sträcka. Medeltiden för grön sträcka var 268 sekunder (max. 304 s, min 232 s). Medeltiden för röd sträcka var 212 sekunder (max 237 s, min 175 s). Viktigt för hjullastarens prestation är sträcka och antal moment. En bra prestation för hela systemet, det vill säga grävmaskin, krossverk och hjullastare, bygger på införsel av så mycket material i krossen som den klarar av.

## Arbetsmiljö

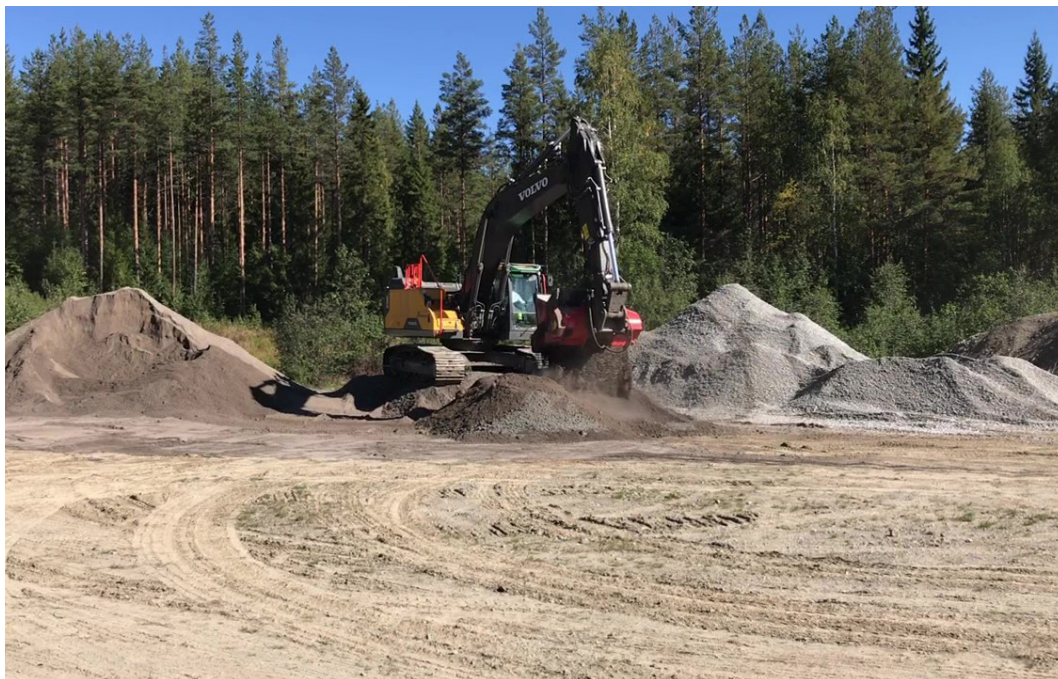


Figur A5. Bilder visar damningsproblematiken som uppstod vid askinblandning i krossverket.

Under försöket uppstod kraftig damning från bland annat askan. Förarna noterade att plastrutor i maskinerna tenderade att bli repiga av askan. Irritation på hud och i luftvägar var påtaglig utanför maskinerna. Förarna undvek att vara utanför maskinerna tills dammet hade lagt sig. Dammbekämpning hade varit att föredra men på grund av att materialet skulle lagras undveks vatten, för att inte riskera att starta en härdningsprocess. För framtida användning av askinblandning i krossverk bör damningsproblematiken lösas.



## TIDSSTUDIE BLANDNINGSSKOPA



Figur A6. Uppställningsplats vid blandning med grävmaskin utrustad med blandningsskopa.

### Måndag 3 september

Utrustningen testades och grävmaskinisten fick bekanta sig med materialet. En testblandning på 83 ton utfördes utan tidtagning.

### Tisdag 4 september

En tidsstudie utfördes och 390,5 ton aska och bergkross blandades. Vädret var soligt och temperaturen 18 °C. Utrustning som användes var en grävmaskin (Volvo EC 300 EI) och blandningsskopa (Alluskopa, DN 3-17). I tidsstudien mättes de olika momenten i en arbetscykel (se nedan) och den genomsnittliga produktionstiden var 1,70 ton/minut.

### Alluskopa

Moment	Tid (s)	Andel (%)
Kran ut (sticka ut)	1858	13,4
Grip (bryt)	1994	14,4
Kran in (sticka in)	2518	18,2
Flytt av massor	679	4,9
Förflyttning i högen	1261	9,1
Blandar	5504	39,8

### SLUTSATS

I framtiden bör det även undersökas hur hjullastare med blandningsskopa presterar jämfört med grävmaskin. Man bör testa om hjullastare är effektivare på att hantera material inom arbetsområdet och vid lastning av lastbilar.

## TIDSSTUDIE FRÄS



Figur A7. Framryckning med fräs.

Fräsning utfördes 16 augusti 2018 på testväg 1, teststräcka 1, sektion 0/000–1/100. Fräsen (Cat RM-300) körde tur och retur på vägsträckan för att jobba igenom hela vägbredden med ett fräsdjup på 150–200 mm. För att testa fräsen, startade man vid sektion 0/700–1/100 och tanken var att fräsa in den gamla terrassen. Problem med grov sten innebar dock att man fick lyfta fräsen och endast fräsa överbyggnaden. 0/700 till 0/000 frästes endast överbyggnaden, vilket gav en hög kapacitet på fräsen och framryckningshastigheten blev 38 m/minut. Dock var invattningen av materialet problematisk då det var svårt att arbeta in vattnet i blandningen.

### **SLUTSATS**

Fräsen har hög kapacitet om materialet inte innehåller grov sten. Dock måste vattnet blandas in före fräsning.

## TIDSSTUDIE HYVEL

Tidsstudierna för hyvel avser hyvelarbete vid inblandning av aska i överbyggnaden. Studierna utfördes vid två olika tidpunkter med olika väghyvlar och förare.



Figur A8. Blandning med hyvel på testväg 1. Materialet blandas från sida till sida.

### Tidsstudie 1

Tidsstudie 1 med väghyvel (Mattson 376V) utfördes på testväg 1, sträcka 3 (ca 800 m). Materialet vattnades kontinuerligt samtidigt som det blandades med hyveln. Hyveln kunde köra fram hela sträckan och vända i slutet för att sedan påbörja ny hyvling på tillbakavägen. Dock fick hyveln vänta på vattenbilen varpå endast ca 50 procent av maskintiden var hyvling. Snitthyvlingshastigheten var 44 m/minut.

<b>Moment</b>	<b>Tid (s)</b>	<b>Andel (%)</b>
Vända	2470	
Hyvling	1263	51
Vänt/vatten	1207	49



Figur A8. Blandning med hyvel på testväg 1. Materialet blandas från sida till sida.

### Tidsstudie 2

Tidsstudien utfördes med en annan väghyvel (Mattsson 266) på testväg 2, sträcka 3 (ca 200 m) och liksom tidsstudie 1 skedde vattning samtidigt som hyvelblandningen. Hyveln var tvungen att efter varje drag backa till vändmöjlighet, vilket innebar en lägre prestation. Hyveln fick också vänta på vattenbilen. Som en följd av ovanstående blev endast ca 30 procent av maskintiden hyvling. Medelhastigheten för hyvlingen blev 46 m/minut och backhastigheten 81 m/minut. En vända tog 707 sekunder, det vill säga ca 12 minuter.

### Hyvel testväg 2. Sträcka 3 (200 m)

Moment	Tid (s)	Andel (%)
Hyvlar	261	37
Vänder	118	17
Väntar	134	19
Backar	148	21
Övrigt	46	7

### SLUTSATS

Hur effektivt maskinen utnyttjas beror på hur lång sträcka som maskinen kan hyvla ostört från vändningar och annan byggttrafik.

## TIDSSTUDIE LASTBILAR

Tidsstudierna på lastbilarna utfördes under hela projektet. De lastbilar som användes var en fyraxlig lastbil med tvåaxlig kärria och en fyraxlig lastbil med treaxligt släp. Båda var utrustade med CTI (Central Tire Inflation). Lastbilarna transporterade aska, grus och askblandning från krossen och från blandningsskopan (Alluskopa).



Figur A10. Lastbilar i väntan på lastning på bergtälkten vid testväg 1.

Tidsstudien nedan beskriver de olika momenten. De olika momenten innefattar olika köravstånd.

### Askutkörning

Ett lass aska vägde 24 ton och medelhastigheten med last var 28 km/h, medan medelhastigheten utan last var 21 km/h. En vända tog 2174 sekunder, det vill säga ca 36 minuter.

<b>Moment</b>	<b>Tid (s)</b>	<b>Andel (%)</b>
Väntetid lastning	381	17,5
Vändning	16	0,7
Förberedelse lastning	13	0,6
Lastning	562	25,9
Lastkörning	299	13,8
Förberedelse lossning	89	4,1
Lossning	74	3,4
Tomkörning	403	18,5
Städ	279	12,8
Övrigt	58	2,6

### Transport av ask-krossblandning

Ett lass ask-krossblandning vägde 28 ton och medelhastigheten var 26 km/h när lastbilen körde med last och 22 km/h när den körde tom. En vända tog i snitt 2416 sekunder, det vill säga ca 40 minuter.

Moment	Tid (s)	Andel (%)
Väntetid lastning	343	14
Vändning	52	2
Förberedelse lastning	21	1
Lastning	400	13
Lastkörning	595	25
Förberedelse lossning	68	8
Lossning	35	1
Väntetid grusbil	160	7
Väntetid vattenbil	113	5
Tomkörning	721	30

### Transport av grus 0–32

Ett lass grus vägde 30 ton och medelhastigheten med last var 24 km/h och utan 22 km/h. En vända var 4,9 km och tog 1209 sekunder, det vill säga ca 20 minuter.

Moment	Tid (s)	Andel (%)
Väntetid lastning	117	10
Vändning	50	4
Förberedelse lastning	15	1
Lastning	193	16
Lastkörning	375	31
Förberedelse lossning	35	3
Lossning	17	1
Tomkörning	407	34

### Transport av askblandning från Allukopa

Ett lass ask-krossblandning vägde 30,3 ton och medelhastigheten var 33 km/h med last och 39 km/h utan last. En vända var 23,8 km och tog 3464 sekunder, det vill säga 58 minuter.

Moment	Tid (s)	Andel (%)
Vändning	64	1,8
Förberedelse lastning	89	2,6
Lastning	616	17,8
Avlastning	57	1,6
Lastkörning	1284	37,1
Förberedelse lossning	102	3,0
Lossning	52	1,5
Väntetid hyvling	100	2,9
Tomkörning	1100	31,8

### SLUTSATS

I tidsstudien noterades att det som påverkar lastbilarnas kapacitet är lastvikt, avstånd, hastighet och väntetid på övrig trafik. Hastighet, avstånd och lastvikt är förutsägbara medan väntetider på övriga fordon är en viktig aspekt att planera för att kunna beräkna prestationen.

## TIDSSTUDIE VÄLT



Figur A11. Vältning med bogserad vibrovält.

Tidsstudien på välten utfördes den 21 augusti på testväg 1, sträcka 3.

På denna sträcka utfördes askblandning med hyvel. Välten kunde arbeta relativt ostört från transportarbeten. Sträckan som vältades var 1000 m. Välten var en bogserande slätvält (Dynapac CH47) dragen av en jordbrukstraktor (Valtra T140). Mätningarna utfördes under sju överfarter med välten, enligt nedan.

<b>Momentnr</b>	<b>Tid (s)</b>	<b>Moment</b>
1	1069	Vältning
2	265	Transport + Vändning
3	977	Vältning
4	148	Transport + Vändning
5	992	Vältning
6	288	Transport + Vändning
7	971	Vältning
8	139	Transport + Vändning
9	967	Vältning
10	62	Vältning mötesplats
11	79	Vältning mötesplats
12	85	Vältning mötesplats
13	267	Transport + Vändning
14	183	Väntan
15	1071	Vältning

Framryckningshastigheten var 1,2 m/s och prestationen vid 1000 m sträcka för vändning var 0,925 m/s.

Arbetsmoments fördelning:

<b>Moment</b>	<b>Tid (s)</b>	<b>Procent av totaltid</b>
Vältning	6047	80 %
Transport + vändning	1107	15 %
Vältning mötesplats	226	3 %
Väntan	183	2 %

#### **SLUTSATS**

För att få bra produktion på välten bör den jobba utan störningar från annan trafik. Under arbetet på teststräcka 2 (färdig askblandning) var välten tvungen att vara med för att välta de olika lagren på samma sträcka, vilket ledde till en kraftig ökning av väntetid då de övriga maskinerna utförde sina arbetsmoment.



## TIDSSTUDIE FLISBIL



Figur A12. Lossning av aska vid upplag med flisbil.

Tidsstudien utfördes för transport från industrin (Ortviken) till upplaget i Fjäl med ett avstånd på 29,8 km (en vända var alltså 59,6 km). Transporten skedde med flisbils-ekipage, en treaxlig lastbil med fyraaxligt släp. Lasten vägde 43 ton och medelhastigheten med last var 69 km/h och utan last 73 km/h. En vända tog i snitt 5107 sekunder, det vill säga 85 minuter.

<b>Moment</b>	<b>Tid (s)</b>	<b>Andel (%)</b>
Förberedelse lastning	100	2,5
Lastning	1179	23,1
Avslut last	131	2,6
Last kör	1562	30,6
Förberedelse lossning	129	2,5
Lossning	193	3,8
Avslut lossning	177	3,5
Tomkör	1472	28,8
Övrigt	165	3,2

## TIDSSTUDIE VATTENBIL



Figur A13. Vattning av askblandning med vattenbil.

### **Transport**

Medeltransportavståndet är definierat från centrum på vattningssträckan till påfyllningen av vatten. Medeltransporthastigheten var 20 km/h plus ett tillägg på 2 km/h för varje kilometer som medelavståndet ökar. Tilläggstid på transporttiden måste göras för vändningar och långa backningar samt transporter bortom vattningssträckan eller vattentäkten för att hitta en vändmöjlighet. På längre sträckor kör man i 40–50 km/h i marschfart. Observera dock att medelhastigheten sjunker väldigt fort av start och stopp för möten, korsningar och så vidare (se medeltransporthastigheten ovan).

### **Väntan**

Väntetiden påverkas mycket av antal samtida fordon i omlopp. När vattenbil och väghyvel samkör själva går det smidigast. Kortare vägsträckor med dåliga mötes- och vändmöjligheter påverkar också väntetiden. Här finns det en potential till effektivisering i systemet, till exempel hur långt efter grusbilarna som väghyvel och vattenbil ska köra, vad som är lämpliga delsträckor och om vägen är lämplig för ett "hett" asksystem (mötesplatser, vändmöjligheter).

### **Resultat**

Vattningskostnaden varierar med medeltransportavståndet och hur "upphackad" vändan är (antalet vattningar och transporter). Det som slår hårdast på kalkylen är dock väntetiden för att få vattna. Prestationen för enskilda vändor, för alla system, varierar mellan 16,18 m<sup>3</sup>/h och 3,23 m<sup>3</sup>/h.

Exempel tidsstudie från testväg1, Teststräcka 2

Studerade lass										
	Lass 1	Lass 2	Lass 3	Lass 4	Medel	Procent	Diff min- max	Minuter	Timmar	
<b>Kommentar</b>										
<b>Transport</b>	Sekunder	1 269	858	1 190	1 074	1 098	26 %	411	18	0,30
	Antal moment	11	7	8	9	9		4		
<b>Vattning</b>	Sekunder	1 143	1 108	1 199	1 194	1 161	28 %	91	19	0,32
	Antal moment	5	3	4	5	4		2		
<b>Väntan</b>	Sekunder	1 641	787	1 116	1 086	1 158	28 %	854	19	0,32
	Antal moment	4	1	2	2	2		3		
<b>Lastning</b>	Sekunder	750	745	742	750	747	18 %	8	12	0,21
	Antal moment	1	1	1	1	1		0		
<b>Summa</b>	<b>Sekunder</b>	<b>4 803</b>	<b>3 498</b>	<b>4 247</b>	<b>4 104</b>	<b>4 163</b>	<b>100 %</b>	<b>1 305</b>	<b>69</b>	<b>1,16</b>
	<b>Antal moment</b>	<b>21</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	<b>16</b>		<b>9</b>		
<b>Prestation</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>	<b>7,50</b>	<b>10,29</b>	<b>8,48</b>	<b>8,77</b>	<b>8,65</b>				

## Bilaga 2. Byggdagbok

Dokumenterad av Mikael Bergqvist (Skogforsk) löpande under arbetets gång

### **Onsdag 25 juli 2018**

Väder: 30 °C, sol, vind ca 2 m/s

#### **Maskiner:**

Volvo EC 380 Grävmaskin

Volvo L180H Hjullastare

Sandvik UJ440I Förkross

Sandvik UH440I Konkross

Keetrack Explorer H6 Sorteringsverk

Arbetet med blandning av aska och bergmaterial i krossen löpte på bra. Stor damningsproblematik under eftermiddagen. Ingen bevattning skedde under produktion för att undvika att få vatten in i blandningen. I framtiden kan det vara bra om utkörning på väg sker direkt så att materialet inte behöver lagras. Bergtäkten innehöll mycket glimmer. Begränsande faktor i kedjan var att konkrossen gick full. Lagring av askblandningen skedde i tälthall och utanför under grotpapp. Den rena askhögen täcktes efter produktion med en grävare, en hjullastare och två personer. Ett mer stenrikt material kan vara att föredra. Personalen påpekade irritation på hud, ögon och luftvägar från askan. 1422 ton askblandning producerades och det gick generellt väldigt bra.

### **Måndag 6 augusti 2018**

Väder: 20 °C, sol, vind ca 4 m/s

#### **Maskiner:**

L120 G

4-axlig grusbil med 2-axligt släp

4-axlig grusbil med 3-axligt släp

3-axlig kranbil

Sista askan till upplag inkörd till täkt med flisbil. Täckning av aska med grotpapper utfördes med en kranbil med förare (1 h) och en person (1 h) samt hjullastare för att lägga fast grotpappen med 0–20 mm bergkross. Svårigheter att täcka askan på grund av vind. Sträckan före teststräcka 1 grusades upp med 0–30 bergkross. Åtgång ca 1200 ton på en sträcka av 963 m (ca 20 cm tjockt lager). Vägen tenderar att bli för smal. Grusning av teststräcka 1 påbörjades. Teststräcka 1 döptes i hjullastarvägen till ”strecka1”. Externa bilar tiggde till sig lastning.

### **Tisdag 7 augusti 2018**

Väder: 20 °C, Sol

#### **Maskiner:**

L120 G

4-axlig grusbil med 2-axligt släp

4-axlig grusbil med 3-axligt släp

Utkörning av grus på Teststäcka 1.

### **Onsdag 8 augusti 2018**

Väder: 23 °C, Sol

#### **Maskiner:**

L120 G

4-axlig grusbil med 2-axligt släp

4-axlig grusbil med 3-axligt släp

Utkörning av 0-30 grus på Teststäcka 3.

### **Torsdag 9 augusti 2018**

Väder: 20 °C, Sol, hög luftfuktighet

#### **Maskiner:**

L120 G

4-axlig grusbil med 2-axligt släp

4-axlig grusbil med 3-axligt släp

Kompletteringsgrusning av mötesplatser och vändplaner 0-30.

### **Måndag 13 augusti 2018**

Väder: 22 °C, Sol

#### **Maskiner:**

L120 G

4-axlig grusbil med 2-axligt släp

4-axlig grusbil med 3-axligt släp

Väghyvel Mattsson 376V

Valtra jordbrukstraktor med CH 47 vält

3-axlig vattenbil med 10 m<sup>3</sup> vattentank

Utkörning av färdigblandning på Teststräcka 2, 1:a lagret på 10 cm läggs ut, vattnas och vältras på sträckan 0/000-1/050. Startar 2:a lagret på 10 cm på sträcka 0/000-0/200.

Materialet var svårt att sprida med grusbil. Materialet flöt inte jämnt ut, utan kom i sjok.

Bilarna körde ut två lass var, alltså fyra lass. Sedan drog hyveln ut till 10 cm tjocklek. Vattenbilen vattnade in materialet, hyveln blandade in vattnet i materialet, vattenbilen vattnade in en gång till, hyveln blandade in vattnet, vattenbilen vattnar en tredje gång. Hyveln blandar in vatten och justerar ytan. Välten packar med sex överfarer (tre tur- och returresa). Lastbilarna upprepar fyra lass och så vidare. Notering från hjullastaren att materialet kanske inte räcker till!

## **Tisdag 14 augusti 2018**

Väder: 20 °C, Sol

### **Maskiner:**

L120 G

4-axlig grusbil med 2-axligt släp

4-axlig grusbil med 3-axligt släp

Väghyvel Mattsson 376V

Valtra jordbrukstraktor med CH 47 vält

3-axlig vattenbil med 10 m<sup>3</sup> vattentank

Utkörning av färdigblandning på Teststräcka 2, 2:a lagret på 10 cm läggs ut, vattnas och vältas på sträckan 0/200-0/720. Materialet tar slut. Sträcka 0/000-0/720 fick 20 cm lager. 0/720-1/050 fick endast 10 cm lager. Av färdig askblandning hade 1422 ton producerats och lagrat i tälthall. Utlastningen visade att bara 1207 ton hade lastats ut så det var en differens på drygt 200 ton.

Avtäckning av askhög utförs med hjullastare med förare och en person. Avtäckningen tog ca 1 h. Kraftig damning vid lastning av askan. Utkörning av aska startar på Teststräcka 1, sektion 0/700-1/100. Askans dammning var mindre än förväntat. Dock fanns klumpar som satte sig i spridarluckorna på lastbilarna. Vältan fick krossa klumparna. Vissa klumpar var riktigt hårda. Invattning av gruset vid sträcka 0/700-1/100. Lennart från Ljusdal Väg och schakt (fräsentreprenör) kom för att se på projektet.

## **Onsdag 15 augusti 2018**

Väder: 19 °C, sol

### **Maskiner:**

L120 G

4-axlig grusbil med 2-axligt släp

4-axlig grusbil med 3-axligt släp

Väghyvel Mattsson 376V

Valtra jordbrukstraktor med CH 47 vält

3-axlig vattenbil med 10 m<sup>3</sup> vattentank

Kompletteringsgrusning av planer, mötesplatser och transportsträckor med 0-32 grus. Referenssträckan grusades upp, vattnades och vältades tre gånger tur- och retur. Kontrollvägning av hjullastarvåg utfördes för att ge klarhet i de försvunna tonnen i färdigblandningen. 4-axlig bil med 2-axligt släp lastades med hjullastare. Hjullastarens lassvägning visade 27,45 ton och den fasta fordonsvågen vid tåkten visade 27,39 ton, vilket endast var en differens på 60 kg. Anledningen till de saknade tonnen ser ut att vara något annat. Vid utkörning av aska på Teststräcka 1, 0/000-0/700, fanns en ökad andel klumpar i askan. Tvättning av lastbil krävdes. Askans tendens att hårdna ihop på fordonen.

## **Torsdag 16 augusti 2018**

Väder: 22 °C, halvklart

### **Maskiner:**

Väghyvel Mattsson 376V

Valtra jordbrukstraktor med CH 47 vält

3-axlig vattenbil med 10 m<sup>3</sup> vattentank

Cat RM-300 Fräs

Fräsning påbörjades på Teststräcka 1, sektion 0/700–1/100, för att testa hur det fungerade. Fräsen gick en tur- och returresa. Tanken att fräsa in den gamla vägen i blandningen fick kraftigt omprövas på grund av att fräsen plockade upp mycket sten som ökade slitaget på maskinen och minskade framryckningshastigheten, samt att man fick grov sten i inblandningen. Man beslöt att endast jobba i det påförda 0–32-materialet och aska. Detta ledde till att 2 cm oblandat grus blev kvar mot terrassbotten och att askblandningen gick från 20 till 30 procent. Fräsarbetet förflöt dock bättre än förväntat på sektion 0/000–0/700 och blandningsresultatet blev bra.

Problem uppstod vid invattning av blandningen. Fräsmassorna var väldigt ”fluffiga” men vattnet trängde bara ner ca 2–3 cm, så hyveln fick blanda in vattnet mellan vattningarna. När de övre centimetrarna blev fuktiga tenderade de dessutom att bli täta och fungerade som ett lock som fick mer vatten att rinna på ytan. Hyveln fick göra 3-4 tur- och returresor för att få vattnet inblandat innan packning kunde ske med vält (tre tur- och returresor). En sista resa med vattenbil gjordes för att fukta upp den färdiga ytan före helgen. En lärdom var att man måste förvattna materialet innan fräsning. Under vattningen blev vattenbilen den begränsade faktorn.

## **Måndag 20 augusti 2018**

Väder: 18 °C, sol

### **Maskiner:**

L120 G

4-axlig grusbil med 2-axligt släp

4-axlig grusbil med 3-axligt släp

Väghyvel Mattsson 376V

3-axlig vattenbil med 10 m<sup>3</sup> vattentank

Utläggning av aska på sträcka 3. Kompletteringsgrusning. Invattning av grus på sträcka 3 ca 30 m<sup>3</sup> vatten, innan aska påfördes.

### **Tisdag 21 augusti 2018**

Väder: 15 °C, sol

#### **Maskiner:**

Väghyvel Mattsson 376V

Valtra jordbrukstraktor med CH 47 vält

3-axlig vattenbil med 10 m<sup>3</sup> vattentank

Krossning av askklumpar av vält, 17 min. Vattning. 30 m<sup>3</sup> vatten påfördes gruset på måndagen. 10 m<sup>3</sup> vattnade in askan innan grusblandning med hyvel påbörjades. Mycket klumpar i materialet samt sten upp till 300 mm. Hyveln blandade med fyra tur- och returresor. Vattenbilen körde 6,5 resor med vatten 65 m<sup>3</sup>. Svårt att få materialet genomfuktigt. Det var blött på ytan och torrt på djupet. Ask-grusblandningen blev jämn. Välden vältade fyra tur- och returresor. Spårskador på sträcka 1 sedan måndagens körning, sektion 0/350-0/700. Skadorna hyvlades igen och vältades.

### **Måndag 3 september 2018**

Väder: 20 °C, sol

#### **Maskiner:**

Volvo EC 300 El grävmaskin med Alluskopa

Hjullastare

2 grusbilar med släp

2 flisbilar med släp

Förberedande grusning av väg till testväg 2. Test av skopa som blandade 83 ton färdigblandning.

Inkörning av fyra lass aska till gropen. Test av täckningsplast utfördes och den visade sig vara mycket snabbare att använda än GROT-papp och gav en bättre arbetsmiljö.

### **Tisdag 4 september 2018**

Väder: 18 °C Sol

#### **Maskiner:**

Volvo EC 300 El grävmaskin med Alluskopa

Hjullastare

2 grusbilar med släp

2 flisbilar med släp

Tidsstudie av blandning med Alluskopa som blandade 390,5 ton färdigblandning. Förberedande grusning av testväg 2, sträcka 3. Kondens hade bildats under plasten. Inkörning av två lass aska.



### **Onsdag 5 september 2018**

Väder: 16 °C, mulet

#### **Maskiner:**

4 grusbilar med släp

Hjullastare

3-axlig vattenbil

Traktor med vält

Mattson 266 Hyvel

Färdigblandning påfördes på sträcka 1 i två lager på ca 10 cm. Stora problem med spår- bildning i terrassen, främst mellan sträcka 0/040 till 0/200. Stora problem vid trumma. Skador uppkom längs med vägen. Omdirigering krävdes för att köra grus på transport- sträckorna. Vägen höll inte ihop och kraftig spår- bildning i askblandningen uppkom, främst i sektion 0/080 och 0/180. Vattningen var problematisk. MYCKET STRULIG DAG MED VÄNTETID. Grus kördes ut till Sträcka 2 och aska till sträcka 3.

### **Torsdag 6 september 2018**

Väder: 14 °C, mulet/regn

#### **Maskiner:**

3-axlig vattenbil

Traktor med vält

Mattson 266 Hyvel

Under natten till torsdagen hade det fallit 4,5 mm regn. Lätt regn även under dagen. Blandning av aska och grus utfördes med hyvel. Test av blandningsmetodik fick sträckor med grus i botten (ca 5-10 cm tjockt gruslager). På sträcka 3 testades att stränglägga materialet i två omgångar, vilket gav bra resultat. Korta sträckor innebar mycket förflytt- ningstid. Vändplan gick sönder.

#### **Mängder testväg 2**

Sträcka 1: 473,5 ton askblandning

Sträcka 2: 107,6 ton grus

25,53 ton aska

Sträcka 3: 211,85 ton grus

53,2 ton aska