

Effektivt askutnyttjande i vägar

Jenny Vestin, Maria Arm, Desiree Nordmark, Per Hallgren, Charlotta Tiberg,
Anders Lagerkvist, Bo Lind

Effektivt askutnyttjande i vägar

Effective use of ash in road construction

Jenny Vestin, Maria Arm, Desiree Nordmark, Per Hallgren, Charlotta Tiberg, Anders Lagerkvist, Bo Lind

Q9-705

Förord

”Effektivt askutnyttjande i vägar” är en tilläggsstudie till ett större samarbetsprojekt mellan Skogsstyrelsen, Statens geotekniska institut (SGI), och Luleå tekniska universitet (LTU) vilket syftar till att utveckla metoder för att förstärka skogsbilvägar som drabbas av dålig bärighet till följd av ändrat klimat. Inom samarbetsprojektet, som heter ”Skogsbilvägar i ett förändrat klimat” och pågår under 2008–2011, har en skogsbilväg valts ut för uppgradering, och flygaska har använts för att stabilisera och förbättra vägegenskaperna. Projektet ”Effektivt askutnyttjande i vägar” har undersökt hur väl flygaskans härdande egenskaper är utnyttjade i vägen och vilken slutlig homogenitet vägen har.

”Effektivt askutnyttjande i vägar” har genomförts av SGI i samarbete med LTU och Skogsstyrelsen. Studien är finansierad av Värmeforsk och Skogsstyrelsen. Referensgruppen har bestått av Stig Jansson (Cementa), Josef Mácsik (Ecoloop) och Per-Erik Persson (Mälarenergi/Betongteknik). Claes Ribbing (Svenska Energiaskor) och Birgitta Strömberg (Värmeforsk) har också deltagit vid referensgruppsmötena. Vi tackar för värdefulla synpunkter och gott samarbete under projektet.

Sundsvall, december 2010

Jenny Vestin, SGI
projektledare

Abstract

Två provsträckor, uppgraderade med olika mängd aska, utvärderades med avseende på ask-grusblandningens homogenitet och skillnader mellan de båda sträckorna. Ask-grusblandningens homogenitet varierade i vägen även om den förväntade askhalten uppnåddes i medeltal. Packningsgraden blev lägre än förväntat vilket visar på vikten av omsorgsfull vattning och packning. Provsträckan med störst askhalt hade högst styvhet.

Sammanfattning

En stor del av Sveriges skogsbilvägar drabbas varje år vid tjällossningen av nedsatt bärighet. Med ett förändrat klimat som medför ökad årsmedeltemperatur och årsnederbörd kommer tjälperioderna att kortas vilket kommer att leda till fler sättningar och spårbildningar och därmed ytterligare försämrad bärighet hos skogsbilvägarna. Skogsstyrelsen i Västernorrland tillsammans med Statens geotekniska institut (SGI) och Luleå tekniska universitet (LTU) har därför påbörjat ett delvis EU-finansierat projekt för att uppgradera samt miljö- och klimatanpassa skogsbilvägar i mellersta Norrland. En del av projektet innefattar att stabilisera en skogsbilväg med flygaska från ett pappersbruk. För att fördjupa uppföljningen av askvägen ansöktes om extra anslag från Värmeforsk.

Vägen uppgraderades med aska och grus under juni 2009. Det uppgraderade vägvägsnittet är 1500 meter långt och indelat i fyra referenssträckor och två provsträckor. Provsträckorna uppgraderades genom att flygaska frästes in i det befintliga bärlaget till förhållandet 30 % aska och 70 % vägmateriäl. Provsträcka 1 har efter packningen ca 16 cm tjockt ask-gruslager och provsträcka 2 har ca 20 cm tjockt ask-gruslager under slitlagret. Inga ytterligare bindemedel förutom flygaskan har använts i vägen.

Den här fördjupande studien syftar till att undersöka hur homogen ask-grus-blandningen blev i praktiken samt att se hur väl askans hårdande egenskaper har utnyttjats i vägen. De båda provsträckorna jämförs här med varandra för att ge information om hur anläggningsförfarandet kan optimeras. Jämförelse mellan referens- och provsträckor kommer att göras inom ramen för EU-projektet.

Prover har tagits för tunnslipsanalyser samt analys av ask-gruslagrets homogenitet och kalciumoxidinnehåll. Vägens densitet karterades i tre tvärgående profiler på vardera provsträckan och i en längsgående profil för båda provsträckorna. Fallviktsmätning har utförts vid två tillfällen. Resultaten visade att askinnehållet i vägen var ojämnt fördelat i de undersökta punkterna i provsträcka 1 men jämnare fördelat i provsträcka 2. Medelhalten aska varierade mellan 22 och 36 % för de olika provsträckorna och provdjupen. Tunnslipsanalyserna visade att provens struktur var homogen. Partiklarna i proven var slumpmässigt orienterade och det fanns askpartiklar i alla undersökta prov. Densitetsmätningarna visade att vägen mestadels hade en lägre densitet och därmed lägre packningsgrad än vad askblandningen hade i de förberedande laborieförsöken. De djupare punkterna hade en högre densitet än de ytligare. Resultaten kan tyda på att vägen inte frästs till önskat djup och att det djupare vägmaterialet därmed inte blivit uppluckrat. Ingen större skillnad i densitet och packningsgrad kunde utläsas i vägens längdriktning och tvärriktning. Två fallviktsmätningar, i september 2009 och maj 2010, visade att vägens styvhet var mindre på våren än på hösten, troligtvis beroende på att vägen innehöll mer vatten under vårmätningen. Styvheten i provsträcka 2, med dubbelt så stor askinblandning, minskade inte lika mycket som i provsträcka 1.

Laboratorie- och fältstudierna visar att den använda flygaskan är lämplig som vägförbättringsmateriäl och att anläggningsförfarandet kan utvecklas.

Sökord: flygaska, grusväg, homogenitet, uppgradering, fallvikt

Executive Summary

Background

Every year, mainly during soil frost thawing periods, many gravel roads in Sweden suffer from reduced bearing capacity. The bearing capacity is to a large extent influenced by temperature and precipitation. With a climate change that leads to increased average annual temperatures and rainfalls, soil frost periods will become shorter. This will further lead to more settlements, increased rutting and less bearing capacity in gravel roads.

Swedish Forest Agency together with Swedish Geotechnical Institute (SGI) and Luleå Technical University (LTU) has therefore initiated a project partly funded by EU. The project started in 2008. It will be finished within 2011 and will analyse and compile methods for adapting gravel forest roads to climate change. Within this project, part of a forest road was upgraded and stabilized with fly ash from a local paper mill in June 2009. Fly ash has earlier been used for stabilizing roads both in Sweden and in other countries in a number of projects. The fly ash contains mainly calcium and silicate oxides and has thus hardening properties which give high compression strength and high bearing capacity. These properties can be enhanced by adding certain additives like cement or calciumoxide but adding additives also increases the costs for stabilizing a road. It is therefore desirable that the hardening properties of the ash are optimally used so that the constructions can be built without using other additives besides the ash. In this project, the upgraded road section consists of two test sections upgraded with fly ash and four reference sections. Two of the reference sections were upgraded with gravel and the remaining two were only graded. Comparisons between the reference and test sections regarding stiffness and environmental effects will be evaluated in this collaborative project.

To deepen the knowledge about this upgraded forest road complementary funding was provided from Värmeforsk. The object of this study was to examine how homogenous the ash-gravel mixture became in practice and how well the hardening properties of the ash have been used in the road. The test sections are here compared to give information about how the construction methods can be optimized. The general aim is to optimize the road building process so that the hardening capacity of the fly ash is optimally used and that no other additives will be necessary.

Methods

The fly ash used in the road was produced at the paper mill Ortviken in Sundsvall where bark and sludge containing fibres, ash, organic material and micro organisms are burnt in a fluidized bed incinerator.

The fly ash and material from the road and mixtures between them were characterized during winter 2008 and spring 2009. A thorough chemical characterization was performed on the ash. Different mixtures (20% and 30% fly ash in combination with road material) were characterized considering optimal water ratio, density and compression strength. The mixtures were also hardened and thereafter characterized considering compression strength and compression strength after 12 freeze-thawing

cycles. Soil frost heaving tests were also performed. Based on the results from the laboratory tests and the fact that there was a large supply of ash it was determined to use a mixture of 30% fly ash and 70 % road material in the test sections.

The road was upgraded in June 2009. The upgraded part is 1500 meters and divided into four reference sections and two test sections. Reference sections 0 and 3 are not upgraded with gravel. Reference sections 1 and 2 are upgraded with 15 cm base course (gravel size 0-32 mm) and 7 cm surface course (gravel size 0-18 mm). Both reference and test sections are upgraded with ditching and grading. The fly ash was transported and laid out by trucks before it was milled into the existing road. The road was thereafter graded again before watering and packing (6 tons vibration roller, 5 passages). Finally a surface course (depth 7 cm gravel size 0-18 mm) was laid. Test section 1 has been upgraded with 12 cm loose fly ash and a total milling depth of 20 cm. Test section 2 has been upgraded with 24 cm loose fly ash and a total milling depth of 39 cm. The milling was made twice i.e. back and forth along the sections. After packing, the depth of the ash-gravel layer was 16 cm for test section 1 and 20-25 cm for test section 2. Besides the ash, no other binding agents have been used in the road. The watering of the road became 33 litres per meter. According to the laboratory tests, this amount was sufficient for test section 1 but insufficient for test section 2 with twice as much ash. Unfortunately, damages to the watering machines made it impossible to spread more water.

Samples from the test sections have been characterised by thin section analyses and the homogeneity of the ash-gravel mixture has been evaluated by XRF-analyses. The density and thereby the degree of compaction of the test sections have been evaluated in lengthwise and transverse directions and the stiffness has been evaluated by falling weight deflectometer measurements.

Results and discussion

The laboratory tests show that the compression strength was enhanced with increased amount of ash in the samples. This effect was more pronounced after the samples were hardened. (Figure 1) The samples were not significantly influenced by the soil frost heaving experiments.

Samples were taken from both test sections at two different depths below the surface course. Analyses of the ash content show that the ash was somewhat unevenly distributed across the road and that the average content varied between 22-36 %. The wanted content was 30 % ash. The ash content showed larger variations between different depths than in the lengthwise or transverse directions. This may indicate that the mixing of ash into the road was insufficient at deeper levels.

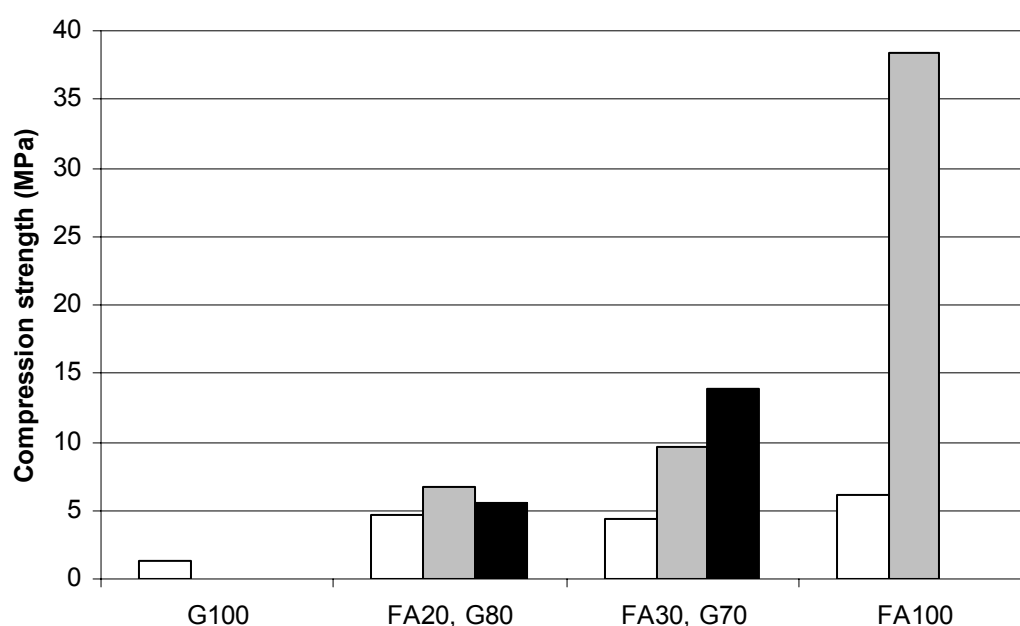


Figure 1. Compression strength for untreated samples (white), carbonated samples (grey) and carbonated samples exposed to 12 freeze-thaw cycles (black). FA100 denotes 100 % fly ash, FA20G80 denotes 20 % fly ash and 80 % gravel, FA30G70 denotes 30 % fly ash and 70 % gravel, G100 denotes 100 % gravel.

The density of the test sections were measured both in lengthwise and transverse direction at two depths below surface course (7,5 cm and 15 cm for test section 1 and 7,5 cm and 30 cm for test section 2). The density measured in field was in most cases lower than the optimal density obtained from laboratory tests and mostly the density increased with depths. In the upper part of the road, the optimal density was not reached and the degree of compaction was lower than expected. This is probably due to insufficient packing in combination with the fact that not enough water was spread on the road during upgrading. The higher density and thereby the higher degree of compaction at deeper levels indicates that the milling of the ash did not reach the desired depths and that the road material thus has not been loosened at these depths. (Table 1) There was no distinct difference in density and degree of compaction along or across the road which reflects the low traffic load.

Table 1. Degree of compaction (%) for the two test sections in lengthwise direction.

Test section 1	22 m	62 m	102 m	142 m	182 m	222 m	
7,5 cm	78	86	80	67	87	91	
15 cm	85	83	92	85	95	82	
Test section 2	24 m	64 m	104 m	144 m	184 m	224 m	264 m
7,5 cm	73	70	73	82	83	97	102
30 cm	96	89	101	101	90	107	128

The stiffness of the test sections were measured twice by falling weight deflectometer measurements in September 2009 and May 2010. The stiffness was in general lower in spring than in autumn because the road contained more water during this measurement. During the measurement in September, the stiffness in test section 2 was 5-8 % higher than the stiffness in test section 1 and during the measurement in May; the stiffness in test section 2 was 17-27 % higher than in test section 1. When comparing the sections, the stiffness in test section 2 during spring, with twice as much ash, was thus not reduced as much as in test section 1.

Conclusions

Laboratory and field studies have shown that this fly ash was suitable for upgrading roads. The homogeneity of the ash-gravel layer varied, although the expected mixture of 30 % ash and 70 % road material was obtained in average. Therefore the mixing technique needs to be optimized. The obtained degree of compaction was too low mainly due to low amount of water and insufficient packing when upgrading the road. To get a road with desirable properties it is thus important to obtain enough water during upgrading. The packing of the road after watering is also of importance. Test section 2, with twice as much ash as in test section 1, seems to have a better development according to the stiffness measurements. This will be further examined with more falling weight deflectometer measurements. Comparisons between the reference sections and the test sections will be reported in later publications during 2011.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	FORSKNINGSUPPGIFTEN.....	2
1.3	MÅL OCH MÅLGRUPP	2
2	METODBESKRIVNING	3
2.1	OMRÅDE	3
2.2	BESKRIVNING AV ORTVIKENS ASKPRODUKTION	3
2.3	MATERIALKARAKTERISERING	4
2.3.1	<i>Karakterisering av flygaska</i>	<i>4</i>
2.3.2	<i>Karakterisering av ask-grusblandningar.....</i>	<i>5</i>
2.4	BESKRIVNING AV PROV- OCH REFERENSSTRÄCKOR	5
2.5	HOMOGENITETSSTUDIER.....	10
2.5.1	<i>Bestämning av askhalt.....</i>	<i>11</i>
2.5.2	<i>Bestämning av mikrostruktur med tunnslipsanalyser</i>	<i>11</i>
2.5.3	<i>Densitetsmätningar</i>	<i>12</i>
2.6	BESTÄMNING AV ASKANS KVARVARANDE PUZZOLANA EGENSKAPER	12
2.7	UPPFÖLJNING AV VÄGENS STYVHETSUTVECKLING.....	12
3	RESULTATREDOVISNING	14
3.1	MATERIALEGENSKAPER	14
3.1.1	<i>Flygaskans egenskaper.....</i>	<i>14</i>
3.1.2	<i>Ask-grusblandningars egenskaper</i>	<i>16</i>
3.2	RESULTAT FRÅN OKULÄR BESIKTNING AV PROV- OCH REFERENSSTRÄCKOR	18
3.3	VÄGBLANDNINGENS HOMOGENITET	19
3.3.1	<i>Askhalt.....</i>	<i>19</i>
3.3.2	<i>Mikrostruktur.....</i>	<i>21</i>
3.3.3	<i>Densitet – packningsgrad.....</i>	<i>23</i>
3.4	KVARVARANDE PUZZOLANA EGENSKAPER – HALT AV FRI KALCIUMOXID	25
3.5	PROVSTRÄCKORNAS STYVHET	25
4	RESULTATANALYS.....	27
4.1	MATERIALEGENSKAPER	27
4.1.1	<i>Analys av flygaskans egenskaper.....</i>	<i>27</i>
4.1.2	<i>Analys av ask-grusblandningarnas egenskaper</i>	<i>27</i>
4.2	ANALYS AV VÄGBLANDNINGENS HOMOGENITET	27
4.2.1	<i>Askhalt.....</i>	<i>27</i>
4.2.2	<i>Mikrostruktur.....</i>	<i>28</i>
4.2.3	<i>Densitet – packningsgrad.....</i>	<i>28</i>
4.3	KVARVARANDE PUZZOLANA EGENSKAPER – HALT AV FRI KALCIUMOXID	29
4.4	PROVSTRÄCKORNAS STYVHETSUTVECKLING	29
5	SLUTSATSER.....	32
6	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	33
7	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBETE	34
8	LITTERATURREFERENSER.....	35

Bilagor

A ANALYS OCH PROVNINGSMETODER

B DENSITETSMÄTNINGAR

C FALLVIKTSMÄTNINGAR

D RESULTAT DENSITETSMÄTNINGAR

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Skogsindustrin är en nyckelnäring i Sverige och dess virkestransporter ställer stora krav på körbara vägar under alla delar av året till massa-, pappers- och trävaruindustrin. Varje år, framför allt under tjällossningsperioden, drabbas en stor del av skogsbilvägarna av nedsatt framkomlighet och en del sträckor måste stängas av under viss tid för att vägarna har för låg bärighet. Bärigheten påverkas i stor utsträckning av nederbörd och temperatur. Enligt SMHIs klimatmodelleringar [1] kommer årsmedeltemperaturen och årsnederbörden att öka. Därmed blir tjälperioderna kortare och det blir fler växlingar mellan plus- och minusgrader (nollgenomgångar). Detta kommer att medföra sättningar och spårbildningar och därmed försämrade bärighet hos skogsbilvägarna.

Med detta som bakgrund påbörjade Skogsstyrelsen i Västernorrland tillsammans med Statens geotekniska institut (SGI) och Luleå tekniska universitet (LTU) ett delvis EU-finansierat projekt för att uppgradera samt miljö- och klimatanpassa skogsbilvägar i mellersta Norrland. Projektet startade 2008 och kommer att avslutas under 2011. Det är ett omfattande samarbetsprojekt som syftar till att ta fram ny kunskap och sprida kunskap om klimatanpassning av skogsbilvägar. Projektet kommer att analysera vägnätet ur klimatförändringsperspektiv samt sammanställa metoder för att klimatanpassa vägar och vattenövergångar. Inom projektet stabiliserades en skogsbilväg med flygaska från ett av regionens pappersbruk. Den uppgraderade vägen har fyra referenssträckor och två provsträckor. Två referenssträckor är inte uppgraderade, två referenssträckor är uppgraderade med bärlager- och slitlagergrus och två provsträckor är uppgraderade med olika mäktigt ask-gruslager samt slitlagergrus. Sträckornas styvhet och deras miljöpåverkan kommer att undersökas och jämföras med varandra inom ramen för samarbetsprojektet.

För att utöka uppföljningen av asksträckorna ansöktes om extra medel från Värmeforsk. Detta kompletterande projekt syftar till att undersöka hur väl askans hårdande egenskaper är utnyttjade i vägen samt hur homogen ask-grusblandningen blev i vägen.

Flygaska har i tidigare försök använts som stabilisering i vägar både i Sverige och i andra länder [2–6]. Fältförsöken har föregåtts av omfattande laborativa undersökningar och flygaska har visat sig ha goda egenskaper för att stabilisera vägmateriäl [7–13]. Flygaska består till stora delar av kalcium- och kiseloxid och bör därför ha puzzolana egenskaper såvida den utsatts för tillräckligt hög temperatur för att kiseloxiden ska bli reaktiv [13]. Puzzolana egenskaper ger hög tryckhållfasthet och bra tjäl- och frystö-egenskaper [7–13] samt bidrar även till låg utlakning av metaller när aska används som vägbyggnadsmateriäl [5,13].

Varje flygaska har unika egenskaper beroende på bränsle, förbränningsanläggning och lagringsförhållanden [6]. Mácsik et al. (2004) har klassificerat askor efter deras geotekniska egenskaper [9]. Flygaskorna delas in i tre grupper, A–C, beroende på

vattenkvot, kalciumoxidinnehåll, portal och hållfasthet där flygaskornas vattenkvot och kalciumoxidinnehåll är viktiga egenskaper för hållfastheten.

För att öka en vägkropps tryckhållfasthet och förbättra dess tjälnings- och frys-tö-egenskaper kan olika bindemedel såsom cement, merit eller kalciumoxid (CaO) blandas med askan [5, 7–10]. Denna inblandning fördyrar dock hanteringen och därmed vägkonstruktionen. Önskvärt är därför att askans puzzolana egenskaper tillvaratas så att vägar eller andra konstruktioner kan byggas utan inblandning av andra bindemedel.

1.2 Forskningsuppgiften

Det här Värmeforskningsprojektet ingår i ett större samarbetsprojekt där en grusbilväg uppgraderats med flygaska. Vägen har efter uppgradering fyra referenssträckor och två provsträckor. En jämförelse mellan referens- och provsträckorna kommer att göras inom ramen för samarbetsprojektet.

Värmeforskningsprojektet syftar till att fördjupa uppföljningen av de båda provsträckorna för att se hur anläggningen av vägen kan optimeras. De båda provsträckorna är undersökta och jämförda med varandra för att se hur homogen ask-grusblandningen blev i praktiken, hur väl askans härdande egenskaper är utnyttjade i vägen samt för att se skillnad i styvhet mellan de båda provsträckorna vilka har olika mäktigt ask-gruslager.

Prover från vägen har karakteriserats med tunnslipsanalyser och ask-grusblandningens homogenitet har undersökts med XRF-analyser. Provsträckornas densitet och därmed packningsgrad har undersökts i tvär- och längdriktning. Asksträckornas styvhet har jämförts med hjälp av fallviktsmätningar.

1.3 Mål och målgrupp

Projektets mål är att ge information om eventuella skillnader i styvhet och homogenitet mellan de båda provsträckorna. Därmed förväntas projektet ge svar på hur anläggningsförfarandet kan optimeras så att flygaskans härdande egenskaper kan utnyttjas utan att andra stabiliseringsmedel behövs vid anläggningen.

Tjänstemän inom skogsnäringen, entreprenörer som bygger eller trafikerar vägar samt skogsägare är viktiga målgrupper för projektet.

2 Metodbeskrivning

Flygaska från Ortvikens pappersbruk har använts för att stabilisera och förbättra egenskaperna hos en grusbelagd skogsbilväg. Flygaskan och väggruset samt blandningar av materialen har studerats i laboratorium och i fältförsök.

Följande undersökningar har utförts för att undersöka hur effektivt askan har blandats med befintligt vägmateriäl:

- kontroll av homogeniteten hos ask-grusblandningen i vägen genom okulär besiktning samt med XRF-analys av indikatorelement i vägprover (avsnitt 2.5.1)
- undersökning av provvägens mineralogi genom analys av tunnslip (avsnitt 2.5.2)
- kontroll av vägens densitet och packningsgrad genom isotopmätningar (avsnitt 2.5.3)
- kontroll av hur väl askans puzzolana egenskaper har utnyttjats genom analys av halten fri kalciumoxid (f-CaO) (avsnitt 2.6)
- kontroll av vägens styvhetsutveckling genom fallviktsmätningar (avsnitt 2.7)

2.1 Område

Skogsbilvägen är belägen väster om Sörkrånge i Timrå kommun och ägs av SCA Skog AB. Vägen fungerar som en primärväg till ett större skogsområde (ca 700 hektar) och är byggd mellan 1968 och 1970, i huvudsak på tidigare åkermark. Vägens överbyggnad består av bärlager med lokalt krossad morän i storleksfraktionen 0–50 mm. Vägen går mestadels i svag sluttning eller i bank på plan mark. Jordarterna i området är morän och finkorniga sediment. I vägens närområde finns några mindre tjärnar och en bäck som avvattnar vägens avrinningsområde. Enligt Skogsstyrelsens inventering finns inga speciella naturvärden i området. Vägens bärighet uppges vara relativt bra under sommaren och vintern men vissa vägavsnitt blir mjuka vid regn. Innan uppgradering hade vägen kraftig spårbildning samt gräsvegetation i mitten och på vägkanterna.

2.2 Beskrivning av Ortvikens askproduktion

Flygaskan som användes vid vägbyggnationen kommer från SCA, Ortviken. För närvarande används askan direkt som fyllnadsmassor inom SCA:s fabriksområde på Ortviken i Sundsvall eller Östrand i Timrå.

Ortviken har tre pannor. Panna 1 har en fluidiserad bädd som eldas med flygaskan från panna 3 samt slam och bark. Slammets består till ca 80 % av fiberslam och ca 20 % bioslam. Båda slammen består av ca 20 % aska från bl.a. kaolinlera och kalciumkarbonat som används både som fyllmedel och som beläggning på papperet. Fiberslammet består även av fibrer och spån. Bioslammet består, förutom askan, av organiskt material och mikroorganismer. Panna 2 eldas med olja. Panna 3 är en rosterpanna som eldas med bark. Ingen flygaska tas ut från panna 3 utan all aska går

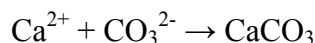
vidare och bränns igen i panna 1. Bark- och slammängderna är i huvudsak konstanta vilket medför att flygaskans egenskaper i stort sett är homogena över året. I provsträckorna har flygaskan från panna 1 använts. Förbränningen sker vid ca 730 °C för panna 1 och panna 3.

2.3 Materialkaraktisering

Under vintern 2008 och våren 2009 karakteriserades flygaskan och vägmaterialet enligt standardiserade metoder på LTU, SGI och Statens väg och transportforskningsinstitut (VTI). Två olika blandningar (20 % flygaska + 80 % vägmateriäl respektive 30 % flygaska + 70 % vägmateriäl) samt 100 % aska och 100 % vägmateriäl undersöktes. Resultaten från undersökningarna avgjorde vilken blandning som användes i vägen.

Det är de puzzolana reaktionerna hos flygaskan som utnyttjas vid förstärkning av skogsbilvägar. Vid kontakt med vatten hårdnar askan genom hydratiseringsreaktioner. Fri kalciumoxid (CaO) som finns i askan hydratiserar till kalciumhydroxid (Ca(OH)₂) som sedan reagerar med olika silikater och bildar bl. a. kalcium-aluminosilikat-hydrat-faser (CaO·Al₂O₃·SiO₂·H₂O) och kalcium-silikat-hydrat-faser (CaO·SiO₂·H₂O) [13, 14]. Kalciumhydroxid kan även bildas vid upplösningen av andra kalciummineral som finns i askan utöver fri CaO.

Stabiliseringen av askan förstärks ytterligare genom utfällning av karbonater i askans porvatten. Det sker när luftens koldioxid löser sig i porvattnet så att det i alkalisk miljö bildas karbonatjoner (CO₃²⁻) som kan reagera med lösta katjoner. Så småningom täpps porerna till och partiklarna i askan binder ihop [14, 15]. Den vanligaste karbonatiseringsreaktionen är bildningen av kalciumkarbonat:



2.3.1 Karakterisering av flygaska

Askan karaktäriserades genom analys av torrsubstans (TS) och glödgningsförlust (GF), pH, elektrisk konduktivitet (EC), redoxpotential (E_h), syraneutraliserande kapacitet (ANC), kolspeciering (TC, IC, TOC), fri kalciumoxid (f-CaO), totalhalt av grundämnen samt lakningsegenskaper (batchtest vid L/S 10). De analysmetoder som använts för karaktäriseringen av askan finns beskrivna i bilaga A.

För att säkerställa att utläggning och inblandning av askan i vägen inte skulle omöjliggöras av att askan kommit i kontakt med vatten under hanteringen, och därmed startat hydratiseringen, undersöktes askans härdningsförlopp. Det gjordes genom att mäta förändringen i askans skjuvhållfasthet över tiden sedan den blandats med vatten. Försöket utfördes som fallkonförsök enligt Svensk standard SS 027125. Askans vattenkvot var 54 % och försöket gjordes på lätt inskakat material utan kompaktering. Försöket finns beskrivet i bilaga A.

2.3.2 Karakterisering av ask-grusblandningar

Flygaskan, vägmaterialet och blandningarna mellan dessa (20% resp. 30% askinblandning) undersöktes och dess optimala vattenkvot och densitet erhöles med Proctorpackningsförsök enligt SS-EN 13286-2. Tryckhållfastheten undersöktes med enaxligt tryckförsök enligt SS-EN 12390-3:2002. Materialens kornstorleksfördelning undersöktes enligt SS-EN 933-1. För att se hur materialen påverkades av härdning karbonatiserades provkroppar av blandningarna. Härdningen pågick under 6–7 veckor vid ca 30°C och med hög luftfuktighet och fri tillgång på koldioxid. Dessa prover fick därefter genomgå tryckhållfasthetsförsök både direkt efter karbonatiseringen och efter 12 frys-tö-cykler. Blandningarna genomgick även tjällyftningsförsök enligt VVMB 301.

2.4 Beskrivning av prov- och referenssträckor

Vägen uppgraderades med aska och grus under juni 2009. Resultaten från laboratorieundersökningarna tillsammans med en god tillgång på aska gjorde att man valde en blandning i vägen med 30 % aska och 70 % vägmateriäl i det ihopfrästa lagret. (avsnitt 3.1 och 4.1) Vägavsnittet som har uppgraderats är ca 1500 meter långt och indelat i fyra referenssträckor och två provsträckor. Referenssträcka 0 är 400 meter, referenssträcka 1 är 320 meter, referenssträcka 2 är 160 meter och referenssträcka 3 är 120 meter lång. Provsträcka 1 är 240 meter och provsträcka 2 är 260 meter lång. (Figur 1) Hela vägavsnittet genomgick dikesrensning och hyvling. Referenssträckorna 0 och 3 är inte uppgraderade med grus. Referenssträckorna 1 och 2 är uppgraderade med 15 cm bärlagergrus (stenstorlek 0–32 mm) och 7 cm slitlagergrus (stenstorlek 0–18 mm).

Hela vägavsnittet genomgick dikesrensning och hyvlades innan uppgraderingen (Figur 2a, b). Flygaskan transporterades med lastbil och släp ut till vägen där den lagrades under en vecka innan utläggning (Figur 2c). Flygaskan lades ut med lastbil (Figur 2d) och frästes in i det befintliga bärlagret (Figur 2e). Därefter hyvlades vägen igen innan hela vägsträckan vattnades (Figur 2f) och packades med vibrovält (6 ton, 5 överfarter) (Figur 2g). Ovanpå ask-gruslagret lades slutligen ett 7 cm tjockt grusslitlager (stenstorlek 0–18 mm) (Figur 2h). En översikt av arbetsmomenten och dess tidsåtgång redovisas i Tabell 1.

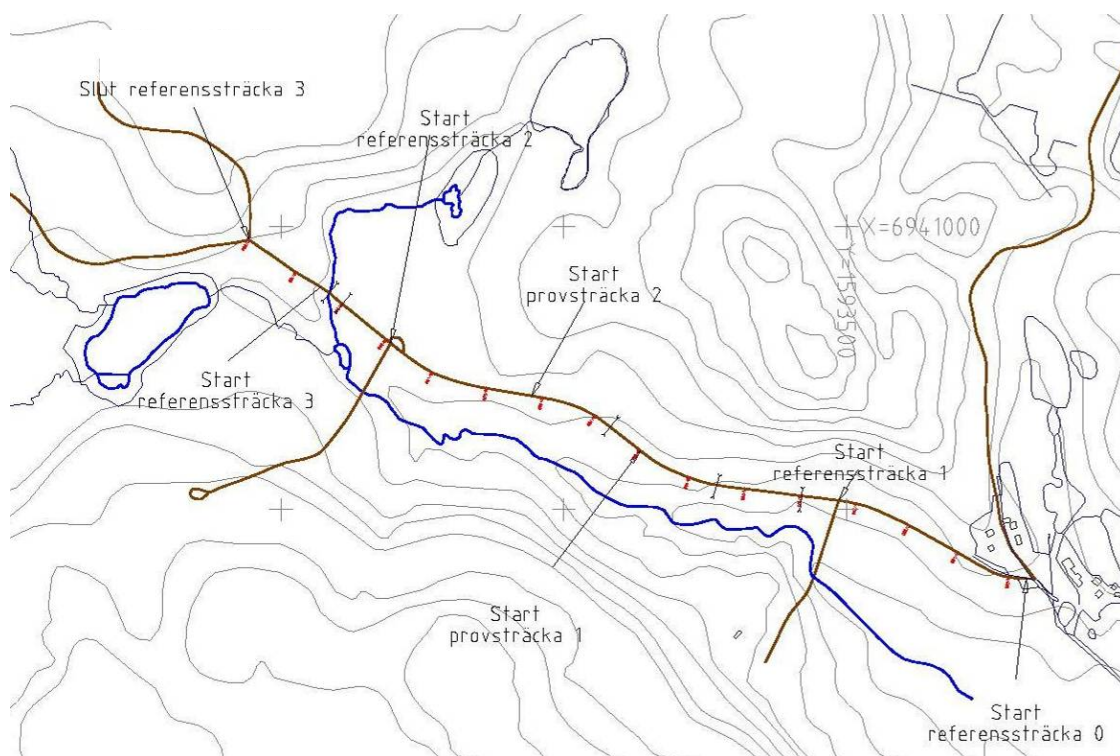
Provsträcka 1 har uppgraderats med 12 cm opackad flygaska, fräsdjup 8 cm i ursprunglig vägkrupp (totalt fräsdjup 20 cm) och provsträcka 2 har 24 cm opackad flygaska, fräsdjup 15 cm i ursprunglig väggropp (totalt fräsdjup 39 cm). Fräsningen utfördes två gånger d.v.s. fram och tillbaka på vägen. Fräsens hade kapacitet att fräsa maximalt 50 cm djupt. (Figur 3). Provsträcka 1 har efter packningen ett ca 16 cm tjockt ask-gruslager och provsträcka 2 har ett ca 20–25 cm tjockt ask-gruslager (Figur 4). Inga ytterligare bindemedel har använts i vägen. Hela vägsträckan vattnades med 33 liter vatten per längdmeter väg. Enligt beräkningarna som baseras på materialets optimala vattenkvot är detta en tillräcklig vattenmängd för det tunnare ask-gruslagret men för liten vattenmängd för det tjockare lagret. Maskinhaverier gjorde det omöjligt att sprida mer vatten. Efter slutförd uppgradering av vägen togs prover i provsträcka 2 för att mäta ask-gruslagrets vattenkvot. Uppmätt vattenkvot var 15 % direkt under slitlagret och 13 % 15 cm under slitlagret.

Tabell 1. Tidsåtgång och arbetsmoment vid vägens uppgradering

Table 1. Time table and activities during upgrading of the road

Aktivitet	Måndag	Tisdag	Onsdag	Torsdag	Fredag
	2 juni	3 juni	4 juni	5 juni	6 juni
Dikning	X	X	X	X	
Röjning (vändplan, askupplag)	X				
Trumbyten avloppstrummor			X		
	8 juni	9 juni	10 juni	11 juni	12 juni
Asktransport	X	X			
Byte valvbåge		X	X		
Slamgropar			X		
	15 juni	16 juni	17 juni	18 juni	19 juni
Hyvling	X	X			
Bärlager	X				
Askutläggning		X			
Fräsning			X		
Slitlager			X		
Packning			X		
Vattning			X		

Tre stycken lysimetrar av fabrikatet Eijkelkamp (Nederländerna) och med storleken 25x25 cm har installerats i provvägen. De sitter på ca 50 cm djup under slitlagret i referenssträcka 0, referenssträcka 1 samt provsträcka 2. Dessutom har 27 st markvattenprovtagare med längden 9 cm och diameter 4,5 mm (av fabrikatet Macro rhizon, Eijkelkamp, Nederländerna) installerats. Markvattenprovtagarna sitter på 30 cm djup i referenssträcka 0, referenssträcka 1 samt provsträcka 2 på avstånden 0,5 meter, 1 meter och 3 meter från vägbankens fot. Tre markvattenprovtagare är placerade i varje provpunkt.



Figur 1. Karta över provområdet med de olika prov- och referenssträckorna markerade.

Figure 1. Map showing the test and reference sections.



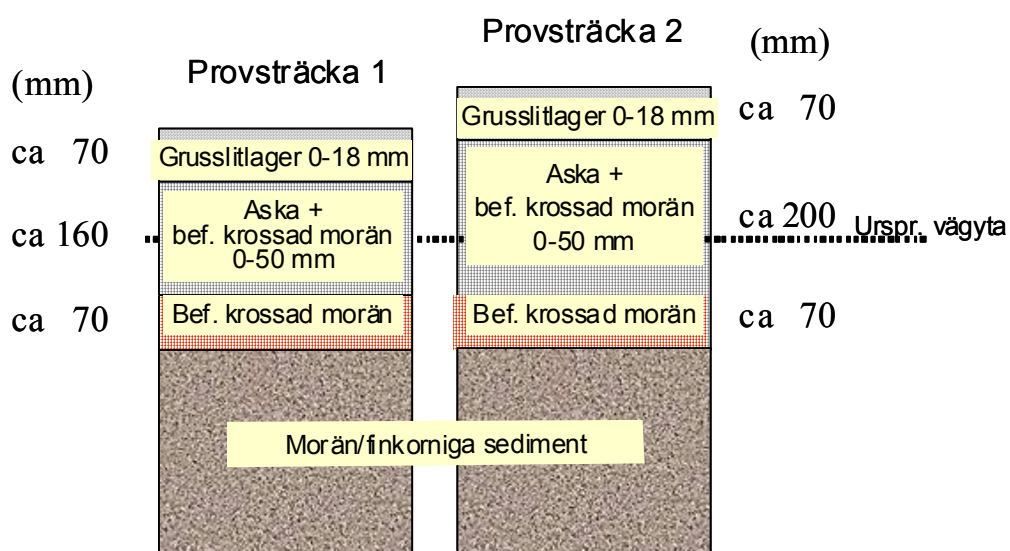
Figur 2. Anläggning av ask-grusvägen a) dikesjustering, b) hyvling av vägen, c) askuplag, d) lastning av aska på grusbil innan askutläggning, e) fräsning, f) vattning, g) packning, h) utläggning av slitlager.

Figure 2. Upgrading of the road a) adjustment of ditches, b) grading of the road, c) store of ash, d) loading of ash before laying, e) milling, f) watering, g) compaction, h) the surface course.



Figur 3. Fräshuvudet

Figure 3. Milling drum



Figur 4. Provsträckornas uppbyggnad.

Figure 4. Structure of test sections



Figur 5. a) Vägen innan uppgradering b) Vägen efter uppgradering med aska

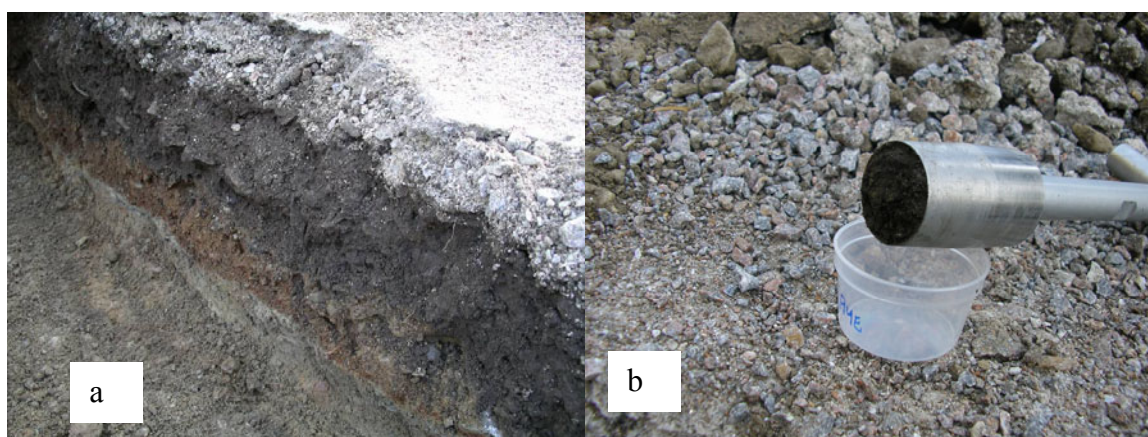
Figure 5. a) The road before upgrading with fly ash b) The road after upgrading with fly ash

2.5 Homogenitetsstudier

För att få prover till undersökningar av ask-gruslagrets homogenitet och vägens CaO-innehåll grävdes ett schakt tvärs över varje provsträcka i oktober 2009 (Figur 6a). Prover med diametern 5 cm togs från två nivåer i båda schaktväggarna (5 cm och 10 resp. 12 cm under vägens slitlager) på respektive sträcka (Figur 6b). Totalt togs 62 prov.

I de grävda schakten var asklagret 11–21 cm tjockt i provsträcka 1 och 15–25 cm tjockt i provsträcka 2.

För att undersöka provsträckornas homogenitet i vägens längdriktning kompletterades provtagningen ovan i maj 2010 med tre ytnära prover längs vägens centrumlinje vid provsträcka 2. Dessa prover togs 5 cm under vägens slitlager på avståndet 2, 4 och 6 m från schaktet i riktning mot provsträckans lysimeter.



Figur 6. a) Provsträcka 1 i genomskärning vid provtagningen under oktober 2009. Överst syns slitlagret och därunder syns ask-grusblandningen. b) Provtagare

Figure 6. Sampling of test section 1 in October 2009. The darker layer is the mixture of ash and gravel. b) sampling

2.5.1 Bestämning av askhalt

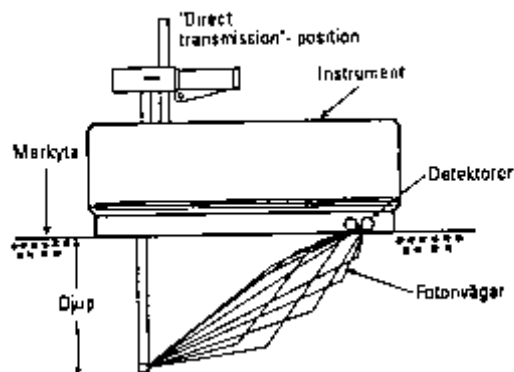
Vägens homogenitet uppskattades bland annat genom analys av zink- och titanhalten (mätt med XRF, röntgenfluorescensspektrofotometri) i de utmejslade vägproverna. Resultaten relaterades till zink- och titanhalten i ren aska respektive grus och användes för att åskådliggöra homogeniteten i inblandningen och andelen aska i provvägen. Zink valdes som indikator på askhalten i vägproverna eftersom andelen zink i askan var hög (1730 mg/kg) i jämförelse med väggrusets zinkhalt (29 mg/kg) samt att zink i askan förekom i en relativt immobil form (0,01 % utlakning vid L/S 10). På samma sätt valdes titan som indikator på grusmängden i proverna eftersom andelen titan var hög i gruset (2600 mg/kg) i jämförelse med askans titanhalt (570 mg/kg). Metoden finns beskriven i Bilaga A.

2.5.2 Bestämning av mikrostruktur med tunnslipsanalyser

Prover togs för tunnslipsanalyser längs två tvärgående profiler på provsträcka 1 respektive provsträcka 2 under juni 2010. Prover togs i båda hjulspåren och i vägens mitt. Åtta prover skickades in för analys till Minoprep AB. Från varje prov kunde två tunnslipsprover erhållas, varav ett undersöktes i vägens längdriktning och ett i vägens tvärriktning.

2.5.3 Densitetsmätningar

Densiteten i vägens ytskikt mättes in situ med isotopmätare av typen direkt transmission enligt VVMB 605 [16] (Figur 7) (Bilaga B). Mätningarna utfördes av VTI under juni 2010.



Figur 7. Mätning med transmitterande isotopmätare [16].

Figure 7. Measurement by means of direct transmission [16]

Provsträcka 1 karterades med 18 punkter i ett rutnät – sex punkter i längsgående riktning och tre tvärgående profiler med fem punkter i varje. Provsträcka 2 karterades med 19 punkter – sju punkter i längsgående riktning och tre tvärgående profiler med fem punkter i varje. De längsgående mätningarna är utförda i vägens mitt och de tvärgående i vägmitt, i båda hjulspåren samt i båda vägkanterna. Mätningarna gjordes på två djup, 7,5 och 15 cm under slitlagret (provsträcka 1) samt 7,5 och 30 cm under slitlagret (provsträcka 2).

Utifrån densitetsmätningarna har packningsgraden i ytskiktet beräknats i de olika punkterna. Packningsgraden är den uppmätta densiteten relaterad till materialets densitet erhållen vid optimal packning vid packningsförsök i laboratorium. Den visar hur väl packningen har lyckats vid vägbyggnationen.

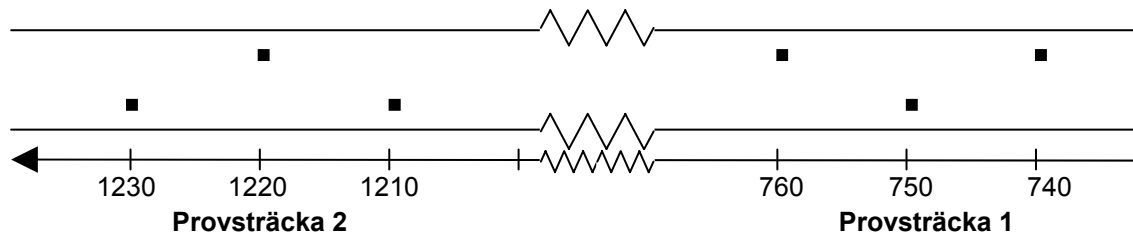
2.6 Bestämning av askans kvarvarande puzzolana egenskaper

Flygaskans fria oreagerade kalciumoxid (f-CaO) bidrar till de puzzolana reaktionerna. Försök med att bestämma mängden fri kalciumoxid i flygaskan gjordes enligt Svensk och Europeisk standard SS-EN 451-1 Metoden finns beskriven i Bilaga A.

2.7 Uppföljning av vägens styvhetsutveckling

De olika sträckornas hållfasthetsutveckling studerades genom fallviktsmätningar enligt VVMB 112 och 114 [17,18] (Bilaga C). Mätningarna utfördes 29 september 2009, 19 maj 2010 samt hösten 2010. De två första mätningarna har utvärderats och redovisas i denna rapport.

Vid varje tillfälle har hela provvägen provbelastats i en punkt på var tjugonde meter i höger hjulspår (Figur 8).



Figur 8. Mätpunkter för fallviktsmätning.

Figure 8. Positions for FWD measurement.

För varje punkt har ytmodulen beräknats. Den anger medelstyvheten för hela skiktet från ett angivet djup och nedåt. Det betyder att ytmodulen på djupet $z = 0$ mm representerar medelstyvheten för hela konstruktionen. På samma sätt representerar ytmodulen på djupet 200 mm medelstyvheten för hela konstruktionen från 20 cm djup och nedåt.

3 Resultatredovisning

3.1 Materialegenskaper

3.1.1 Flygaskans egenskaper

De härdningsförsök som gjordes på flygaskan (vid 54 % vattenkvot) och som utvärderades genom fallkonförsök resulterade i att skjuvhållfastheten för flygaskan ökade från 1 kPa till 5 kPa efter ett dygns härdning. Flygaskan var ändå relativt spröd och kunde lätt smulas sönder med fingrarna. Askan hade inte härdat ihop till en homogen klump. För att den ska göra det behövs sannolikt en betydligt högre kompaktering av askan eller en högre vattenkvot.

Den färska askan hade ett pH på 13,2 och en relativt hög syraneutraliserande kapacitet på 9,52 mmol/g TS. Halten av organiskt kol (TOC) var låg (1,85 %). Andelen fri kalciumoxid som kan delta i reaktioner som sker vid härdningen av askan var 7,0 %. Förhållandet mellan kalciumoxid och kiseldioxid (CaO/SiO_2) var 1,53. Klorider och sulfater bildar lösliga salter och finns ofta i höga koncentrationer i bioaskor. Koncentrationen av klorid och sulfat var 1170 mg/kg TS respektive 450 mg/kg TS.

Av huvudelementen var det kalcium som dominerade i flygaskan med 255 g/kg. Kalcium förekommer dock företrädesvis i mindre mobila former och endast 1 % av askans kalcium mobiliserades vid skaktest vid L/S 10. Kalium och natrium däremot finns i lösliga salter och var därför de ämnen som hade den största utlakningen från askan (21 respektive 12 % av totalhalten). Av de analyserade spårelementen var det barium, zink och strontium som fanns i de högsta koncentrationerna i askan. Barium och strontium hör också till de mer mobila ämnena med en utlakning på drygt 10 % av totalhalten. Zink är inte speciellt mobilt i den färska askan. Det ämne som har den högsta mobiliteten är molybden, men eftersom totalkoncentrationen i askan är låg så innebär det ändå en låg mobil koncentration vid L/S 10. När askan åldras eller blandas upp med andra material ändras den kemiska miljön för askan vilket kan förändra mobiliteten för vissa grundämnen framför allt för de ämnen där mobiliteten styrs av pH och redoxpotential. Resultaten från karaktäriseringen av flygaskan redovisas i Tabell 2 och 3.

Tabell 2. Resultat från karaktärisering av flygaska (medel $\pm$ stdav, n=3).

Table 2. Results from characterisation of fly ash (mean $\pm$ SD, n=3).

Variabel	Enhet	Flygaska
Torrsubstans, 105°C (TS)	%	99,9
Glödningsförlust, 550°C (GF)	% TS	0,69
pH	-	13,2
Konduktivitet	mS/cm	10,6
Redoxpotential	mV	488
Totalt kol (TC)	% TS	2,42 $\pm$ 0,16
Oorganiskt kol (IC)	% TS	0,57 $\pm$ 0,20
Totalt organiskt kol (TOC)	% TS	1,85 $\pm$ 0,16
Löst organiskt kol (DOC), L/S 10	mg/kg TS	24 $\pm$ 1
f-CaO (fri kalk)	% TS	7,0 $\pm$ 0,1
Syraneutraliserande kapacitet (ANC) pH 8,3	mmol/g TS	5,29 $\pm$ 0,10
Syraneutraliserande kapacitet (ANC) pH 4,5	mmol/g TS	9,52 $\pm$ 0,22
Klorid (Cl ⁻), L/S 10	mg/kg TS	1170 $\pm$ 50
Sulfat (SO ₄ ²⁻), L/S 10	mg/kg TS	450 $\pm$ 81

Tabell 3. Totalhalt av grundämnen och lakbar fraktion vid en-steps skaktest L/S 10 L/kg TS för flygaskan (n=3, medel $\pm$ stdav).

Table 3. Total element concentration and leachable fraction at one-step batch leaching test L/S 10 L/kg in the fly ash (n=3, mean $\pm$ SD).

Element	Totalhalt	L/S 10	L/S 10
Enhet	g/kg	mg/kg TS	% av totalhalt
Si	110 $\pm$ 1	9,12 $\pm$ 0,70	0,008
Al	56,8 $\pm$ 0,6	3,65 $\pm$ 0,28	0,006
Fe	44,4 $\pm$ 3,6	<0,04	0,00009
Ca	255 $\pm$ 3	2810 $\pm$ 80	1,1
Na	8,43 $\pm$ 0,11	1000 $\pm$ 50	11,9
K	29,7 $\pm$ 0,8	6330 $\pm$ 390	21,3
Mg	12,8 $\pm$ 0,1	<0,9	0,007
Ti	1,40 $\pm$ 0,04	-	-
S	20,7 $\pm$ 1	4,39 $\pm$ 0,17	0,02
P	13,4 $\pm$ 0	<0,1	0,0007
Mn	11,5 $\pm$ 0	0,00535 $\pm$ 0,00100	0,00005

Forts. Tabell 3

Enhet	mg/kg	mg/kg TS	% av totalhalt
As	<3,15	<0,01	<0,32
Ba	2630±30	279±18	10,61
Cd	3,94±0,32	<0,0005	<0,013
Co	10,17±0,56	<0,000553	<0,005
Cr	58,2±6,7	0,00924±0,00131	0,016
Cu	76,3±3,5	<0,01	<0,013
Hg	0,147±0,001	<0,0002	<0,14
Mo	<6	0,114±0,001	>19
Ni	42,9±1,7	<0,00502	<0,012
Pb	31,1±1,0	0,0165±0,0002	0,05
Sb	-	<0,001	-
Sn	28,2±7,2	-	-
Sr	650±7	71,2±4,4	10,9
V	25,5±0,8	<0,0005	<0,002
W	<60	-	-
Y	8,02±0,27	-	-
Zn	2130±50	0,250±0,024	0,012
Zr	81,0±4,9	-	-

3.1.2 Ask-grusblandningars egenskaper

Två olika blandningar (20 % flygaska + 80 % vägmaterial respektive 30 % flygaska + 70 % vägmaterial) samt 100 % aska och 100 % vägmaterial undersöktes för att karakterisera materialen och för att bestämma vilken blandning som skulle komma att användas i vägen. För att bestämma materialens optimala vattenkvot och högsta densitet packades materialen enligt modifierad Proctor (Tabell 4).

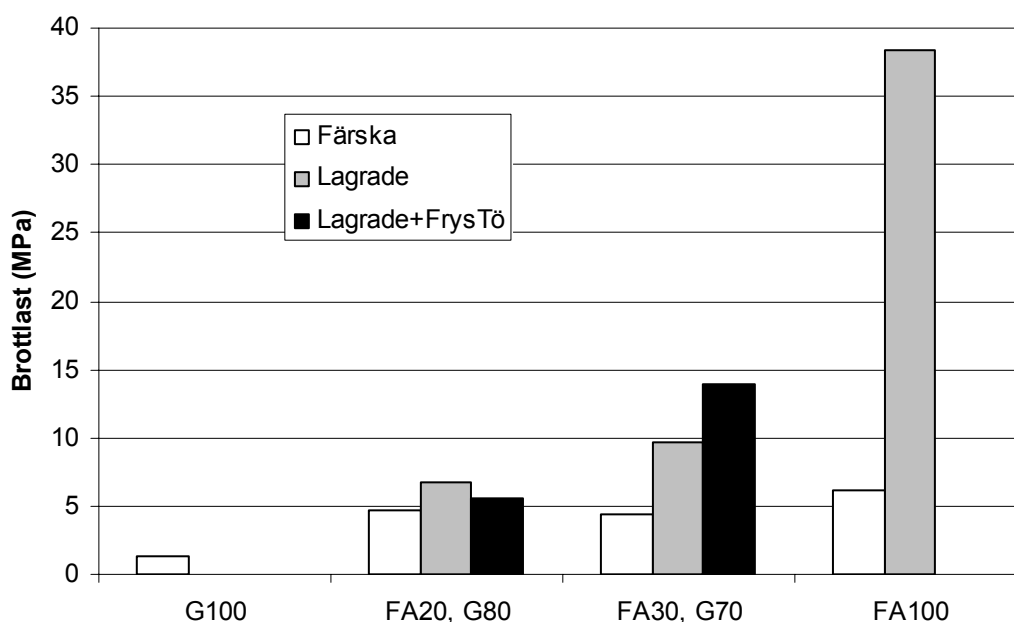
Tabell 4. Optimal vattenkvot och torrdensitet. FA100 beskriver prov med 100 % flygaska, FA20G80 beskriver prov med 20 % flygaska och 80 % vägmaterial, FA30G70 beskriver prov med 30 % flygaska och 70 % vägmaterial, G100 beskriver prov med 100 % vägmaterial

Table 4. Optimal water content and density. FA100 denotes 100 % fly ash, FA20G80 denotes 20 % fly ash and 80 % gravel, FA30G70 denotes 30 % fly ash and 70 % gravel, G100 denotes 100 % gravel.

	Optimal vattenkvot (%)	Torrdensitet (kg/dm ³)
FA100	54	1,03
FA20G80	19	1,59
FA30G70	25	1,48
G100	10	1,86

Efter Proctor-testerna undersöktes materialens tryckhållfasthet med enaxliga tryckförsök. För att utröna hur materialen påverkades av härdning karbonatiserades prover under sju veckor innan tryckhållfastheten undersöktes. En del karbonatiserade prov fick även genomgå 12 frys-tö-växlingar innan undersökningen med enaxliga tryckförsök. Resultaten från tryckhållfasthetstesterna redovisas i Figur 9.

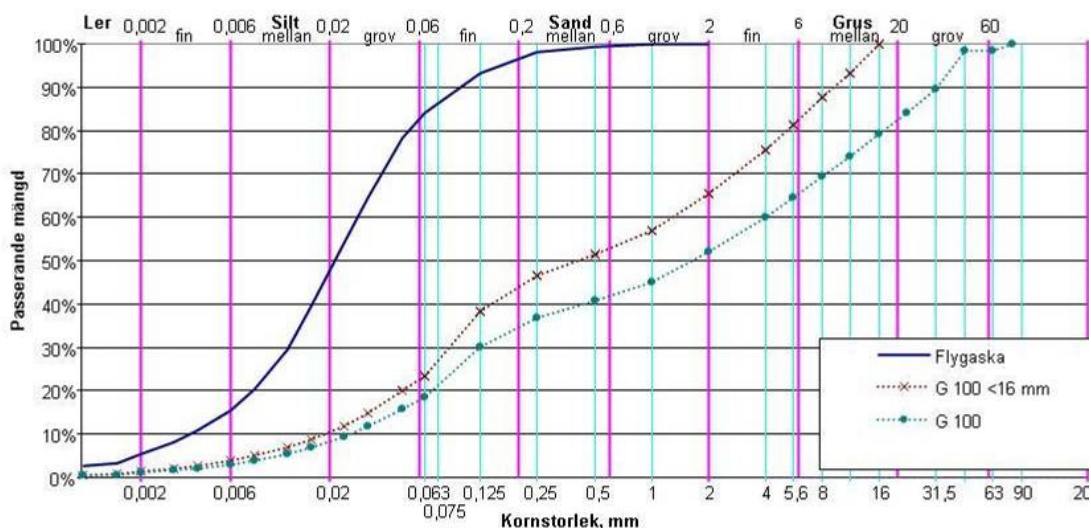
Färska prov fick genomgå tjällyftningsförsök men ingen påverkan på materialen kunde ses.



Figur 9. Tryckhållfasthet undersökt på färska prover (vita), karbonatiserade prover (gråa) samt karbonatiserade prover som därefter genomgått 12 frys-tö-växlingar (svarta). FA100 beskriver prov med 100 % flygaska, FA20G80 beskriver prov med 20 % flygaska och 80 % vägmateriäl, FA30G70 beskriver prov med 30 % flygaska och 70 % vägmateriäl, G100 beskriver prov med 100 % vägmateriäl.

Figure 9. Compression strength for untreated samples (white), carbonated samples (grey) and carbonated samples exposed to 12 freeze-thaw cycles (black). FA100 denotes 100 % fly ash, FA20G80 denotes 20 % fly ash and 80 % gravel, FA30G70 denotes 30 % fly ash and 70 % gravel, G100 denotes 100 % gravel.

Kornstorleksfördelningen för flygaskan och vägmaterialet visas i Figur 10. Två olika kurvor visas för vägmaterialet G100 – en kurva för totala materialet och en kurva för materialet < 16 mm. Vägmaterialet innehöll en del organiskt materiäl.



Figur 10. Kornstorleksfördelning för flygaskan och vägmaterialet (G100).

Figure 10. Grain size distribution for fly ash and gravel (G100).

3.2 Resultat från okulär besiktning av prov- och referenssträckor

Vägen besöktes under april och maj 2010 för att se eventuell påverkan från tjällossningen. Bilderna nedan visar referenssträcka 0, referenssträcka 1 och provsträcka 1 (Figur 11). Referenssträckorna hade ett flertal stora längsgående sprickor. Provsträcka 1 hade ett fåtal mindre sprickor längs ena kanten och provsträcka 2 hade en liten spricka längs kanten.



Figur 11. Vägen i Sörkrånge under tjällossningsperioden. a: referenssträcka 0, b: referenssträcka 1, c: provsträcka 1.

Figure 11. The upgraded road in Sörkrånge during soil frost thawing period. a: reference section 0, b: reference section 1, c: test section 1

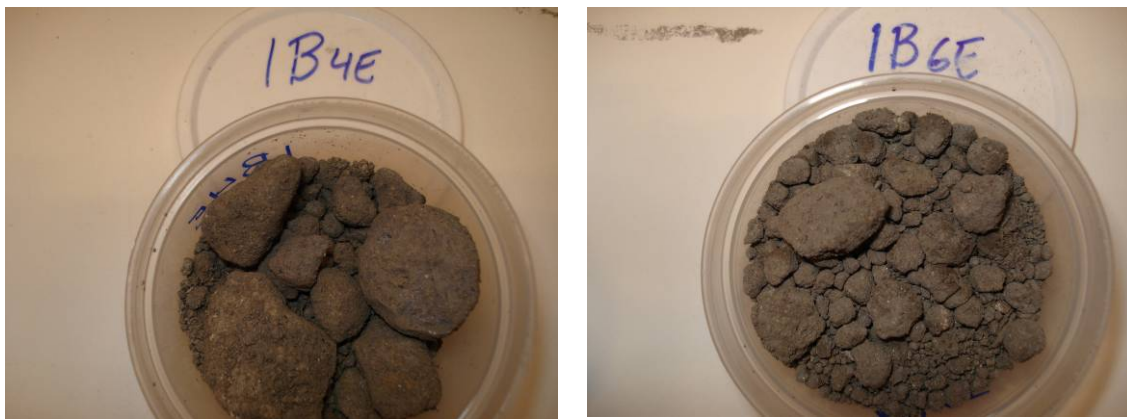
3.3 Vägblandningens homogenitet

Ett syfte med projektet var att borra alternativt mejsla fram provkroppar från vägen och undersöka dessa med avseende på tryckhållfasthet samt tryckhållfasthet efter 12 frys-tö-cykler. Dessa resultat skulle sedan jämföras med tryckhållfastheten som bestämts på laboratorietillverkade provkroppar av samma material. Det visade sig dock vid provtagningen vara omöjligt att få sammanhållande provkroppar till tryckhållfasthetsanalyser varför dessa tester inte kunde utföras.

Vid okulär besiktning av provschakten i de båda sträckorna upplevdes provsträcka 2 som sämre packad och blandad samt mer inhomogen än provsträcka 1. Provsträcka 2 hade också fler och större block än provsträcka 1.

3.3.1 Askhalt

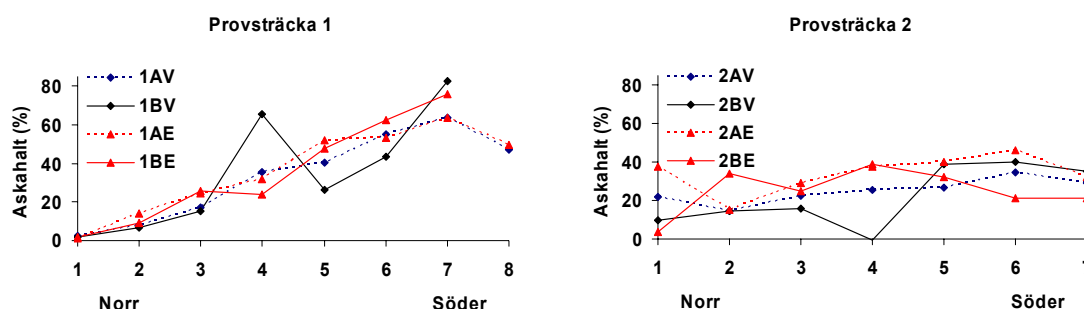
En okulärbesiktning av de utmejslade vägproverna visade att askan hade formats till klumpar i vägmaterialet. Klumparna fanns i varierande storlekar upp till ca 25 mm i diameter (Figur 12). Medelvattenkvoten i proverna från provsträcka 1 och 2 var 32 ± 17 % respektive 25 ± 7 %.



Figur 12. Exempel på vägprov från provsträcka 1, 10 cm under slitlagret.

Figure 12. Samples from test section 1, 10 cm below surface course.

Analysen av askinnehållet i det schakt som grävdes tvärs över provsträcka 1 tydde på att askan var ojämnt fördelad över vägbredden. Askinnehållet på den norra sidan av vägen från vägkanten och ca 1 meter in mot mitten var betydligt lägre än riktvärdet på 30 %. På vägens södra sida var däremot askinnehållet högre än 30 %. Schaktet som grävdes genom provsträcka 2 hade en jämnare fördelning av aska än schaktet i provsträcka 1. (Figur 13)



Figur 13. Askhalt i vägprover från tvärsnitt av provsträcka 1 och 2, västra (V) respektive östra väggen (E). A-prov är tagna 5 cm under slitlagret. B-prov är tagna 10 cm under slitlagret från provsträcka 1 och 12 cm under slitlagret från provsträcka 2

Figure 13. Ash content in road samples from cross section from test sections 1 and 2, western (V) and eastern (E) shaft wall. A samples were taken at a depth of 5 cm below surface course. B samples were taken at a depth of 10 cm below surface course in test section 1 and 12 cm below surface course in test section 2.

De tre vägprov som togs i mitten av provsträcka 2 i vägens längdriktning 2, 4 och 6 m från schaktet och 5 cm under vägens slitlager hade en askhalt på 28, 46 respektive 32 %.

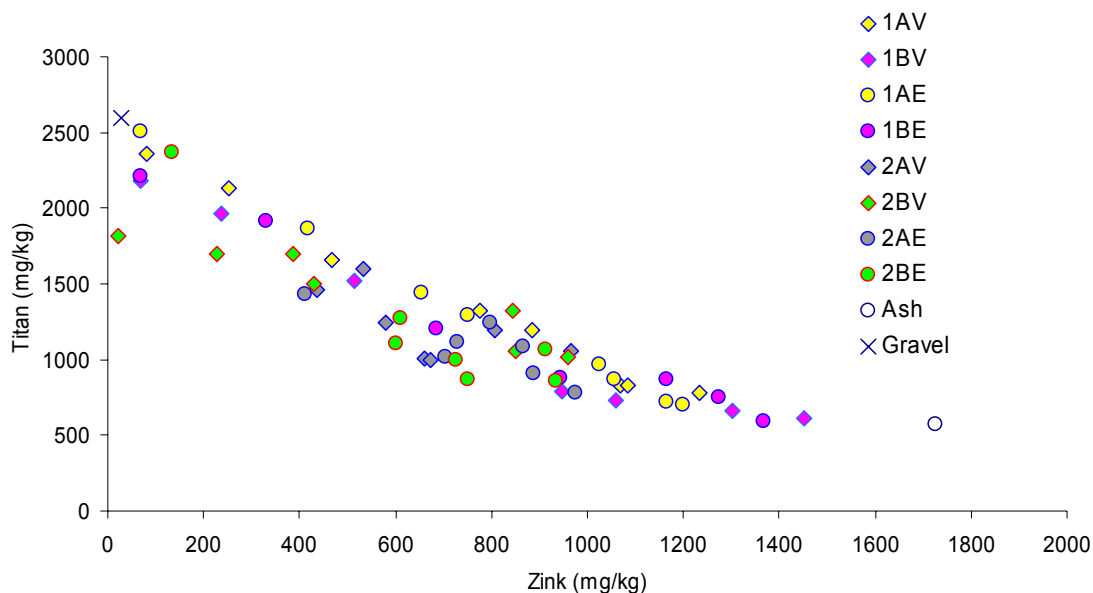
I Tabell 5 finns medelvärden för askhalten i schakten tvärs över vägen från de båda provsträckorna. Askhalten i tvärsnittet av provsträcka 1 var i medeltal något högre än i provsträcka 2. Den ojämna fördelningen av aska i provsträcka 1 återspeglas i den höga standardavvikelsen. Inblandningen av aska på djupet 10–12 cm hade en större variation än de ytligare proverna.

Tabell 5. Askhalt i tvärsnitt över provsträcka 1 och 2 (medel±stdav)

Table 5. Ash content in cross sections from test sections 1 and 2 (mean±SD)

	Provsträcka 1		Provsträcka 2	
Djup från asklagrets överkant (cm)	Västra schaktväggen %	Östra schaktväggen %	Västra schaktväggen %	Östra schaktväggen %
5	34±22	36±22	25±6	34±10
10-12	34±31	35±28	22±16	25±11

Homogeniteten i askinblandningen kan även åskådliggöras i ett spridningsdiagram där vägprovernas zinkhalt är plottad mot titanhalten (Figur 14). Analysen är gjord på fraktionen < 2 mm. Hög zinkhalt respektive låg titanhalt representerar en hög askhalt i provet. Diagrammet visar att variationen i askinblandningen är stor och att spridningen är relativt jämnt fördelad. Prover från provsträcka 2 västra och östra schaktväggen och 5 cm djup (grå cirkel och romb) har den minsta spridningen och ligger väl samlade i mitten av diagrammet.



Figur 14. Spridningsdiagram över titan- och zinkhalter i fraktionen < 2 mm i vägprover från provsträcka 1 och 2 (medelvärde, $n=3$). västra (V) respektive östra väggen (E). A-prov är tagna 5 cm under slitlagret. B-prov är tagna 10 cm under slitlagret från provsträcka 1 och 12 cm under slitlagret från provsträcka 2. V-prover är tagna i västra schaktväggen och E-prover är tagna i östra schaktväggen.

Figure 14. Scatter plot of titan and zinc concentrations in road sample fraction < 2 mm from test sections 1 and 2 (mean, $n=3$). A samples were taken at a depth of 5 cm below surface course. B samples were taken at a depth of 10 cm below surface course in test section 1 and 12 cm below surface course in test section 2. V samples are from the western shaft wall and E samples are from the eastern shaft wall.

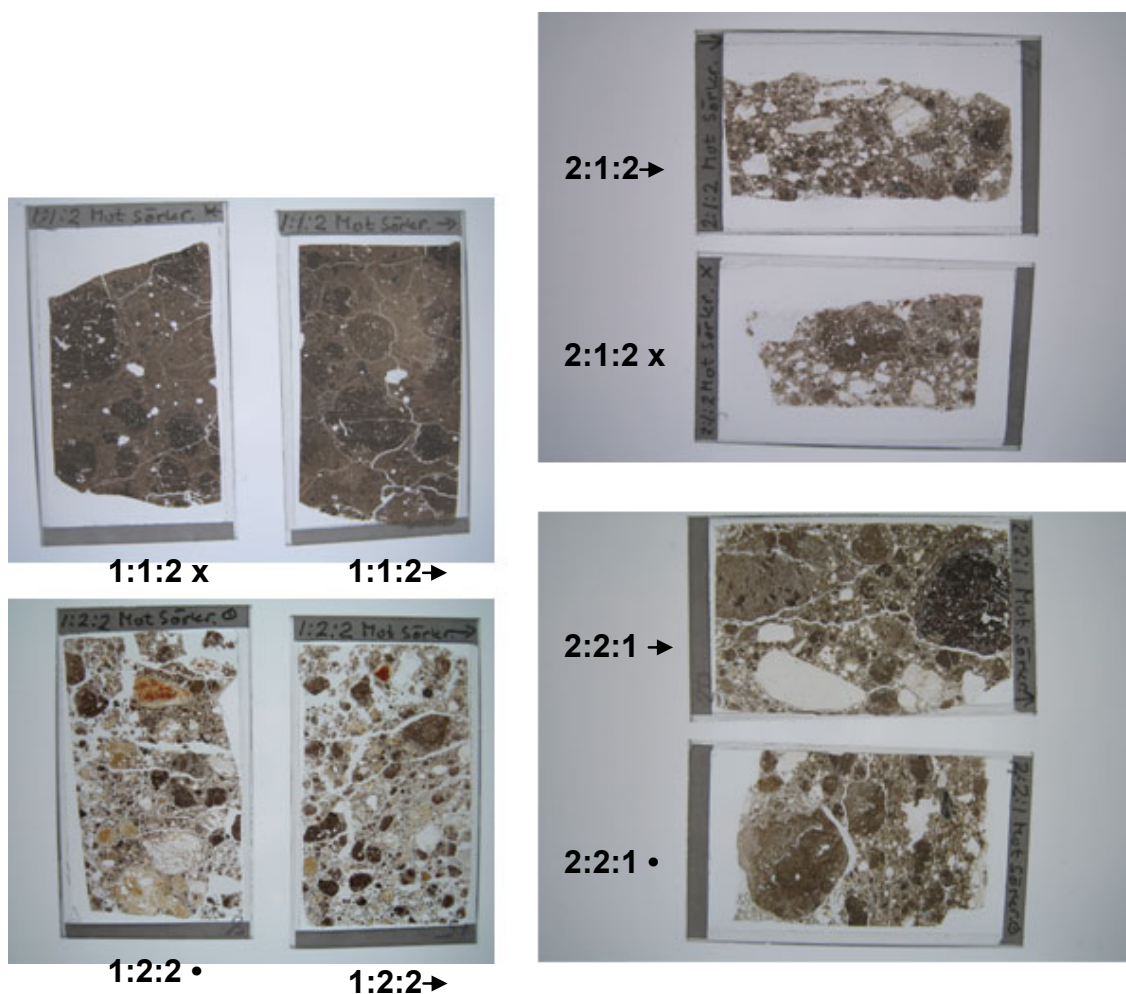
3.3.2 Mikrostruktur

Det finns rikligt med mikrosprickor genom provets matrix. I de flesta fall följer sprickorna mineralkornens gränser men i några fall skär mikrosprickorna kornen. Mineralpartiklar i storlekar upp till drygt 10 mm finns representerade. Ingen mineralogisk analys har genomförts men kvarts och fältspater tycks dominera. Matrix utgörs av både askpartiklar och finjord från befintligt vägmateriäl.

Analyserna visar att provernas struktur är homogen och att partiklarna i proverna är slumpmässigt orienterade. Matrix är finkornigt och det finns askpartiklar i samtliga prover – dock i varierande mängd (Figur 15). Tunnslipen antyder att den finkorniga delen, matrix, är bunden och uppträder som en relativt styv massa som genom uppsprickning bildar en aggregerad struktur.

Samtliga prover från sträcka 1 uppvisar rikligt med sprickor. Sprickorna går i alla riktningar men det tycks finnas en viss preferens för sprickor i horisontell led. Tunnslip 1:1:2 har en annan karaktär än övriga prover vilket tolkas som högre halt av oblandad aska. Många sprickor i proven är ganska stora, se t.ex. 1:2:2. Mineralpartiklarna uppvisade relativt hög kantighet (låg rundningsgrad).

Proverna från sträcka 2 var generellt något mindre än från sträcka 1. Mineralpartiklarna saknade tydligt preferens i orienteringen och var också i huvudsak kantiga, av moräntyp.



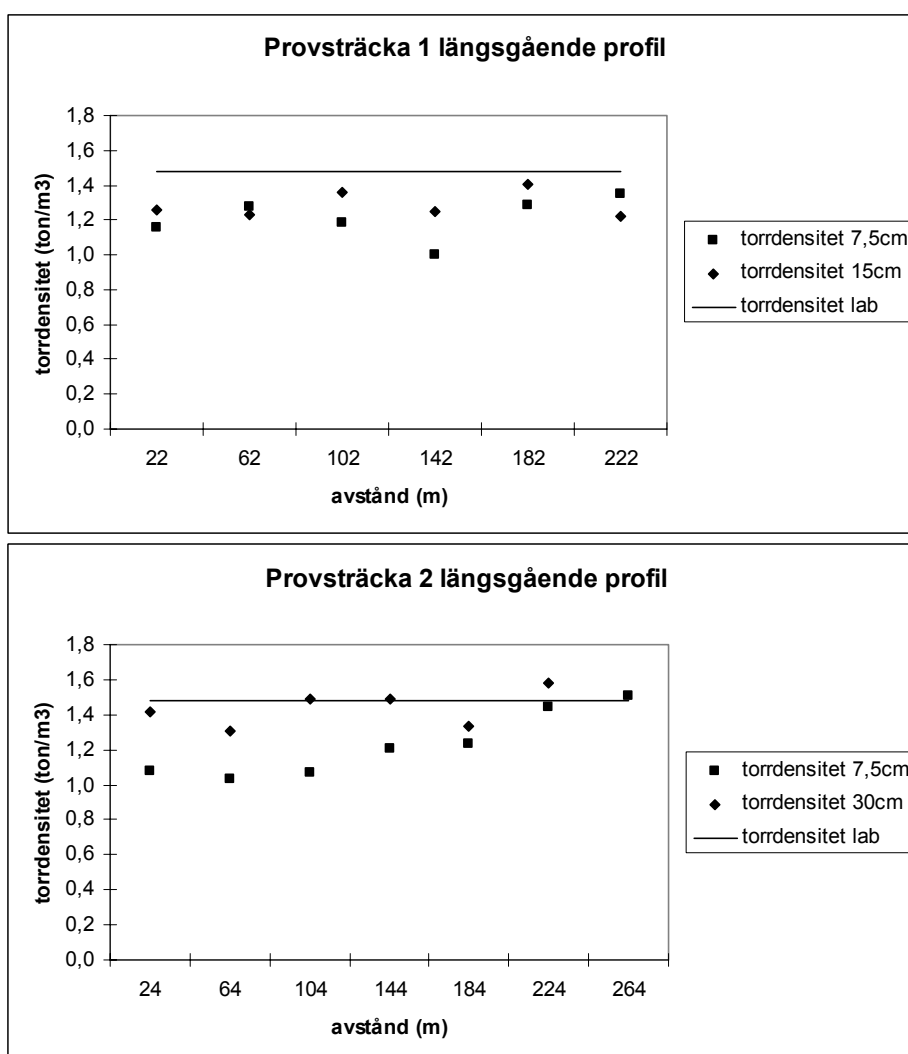
Figur 15. Tunnslipsprover på glas tagna 5 cm under slitlagret. Provernas längd är 45 mm. Vänster: Provsträcka 1, Höger: Provsträcka 2. Kryss eller punkt innebär att provet ligger i vägens riktning. Pil innebär att provet ligger tvärs vägen.

Figure 15. Thin sections from 5 cm depth below surface course. Length of samples: 45 mm. Left: Test section 1, Right: Test section 2. Cross or point means that the sample and

the road are in the same direction. Arrow means that the sample lies across the road.

3.3.3 Densitet – packningsgrad

De flesta av vägens mätpunkter har en lägre densitet jämfört med densiteten som erhöles vid tidigare laborieförsök (Figur 16, Bilaga D Figur 24). Mätningarna visar en högre densitet i de djupare mätpunkterna (15 resp. 30 cm djup) jämfört med de ytligare mätpunkterna (7,5 cm djup) varav de största skillnaderna är uppmätta i provsträcka 2. Packningsgraden för provsträcka 1 är 64–110% vid djupet 7,5 cm och 74–122% vid djupet 15 cm (Tabell 6 och 7). Packningsgraden för provsträcka 2 är 70–102% vid djupet 7,5 cm och 82–128% vid djupet 30 cm (Tabell 6 och 7). Den beräknade packningsgraden är vägens densitet relaterad till materialets densitet vid optimal packning vilken erhöles vid tidigare laborieförsök (Tabell 4).



Figur 16. Densiteten i längsgående profil för respektive provsträcka och djup. Den heldragna linjen markerar torrdensiteten erhöles från laborieförsök.

Figure 16. Density in lengthwise direction for the test sections 1 and 2 at different depths. The line marks the density derived from the laboratory tests.

Tabell 6. Provsträckornas packningsgrad (%) i längsgående riktning. Avstånden är räknat från respektive sträckas start, se Figur 1.

Table 6. Degree of compaction (%) for the two test sections in lengthwise direction.

Provsträcka 1	22 m	62 m	102 m	142 m	182 m	222 m	
7,5 cm	78	86	80	67	87	91	
15 cm	85	83	92	85	95	82	
Provsträcka 2	24 m	64 m	104 m	144 m	184 m	224 m	264 m
7,5 cm	73	70	73	82	83	97	102
30 cm	96	89	101	101	90	107	128

Tabell 7. Provsträckornas packningsgrad (%) i tvärgående riktning. Avståndet är räknat från respektive sträckas start se Figur 1.

Table 7. Degree of compaction (%) for the two test sections in transverse direction.

Sträcka	Djup (cm)	Avstånd (m)	Vänster vägkant	Vänster hjulspår	Vägmitt	Höger hjulspår	Höger vägkant
Provsträcka 1	7,5	22	67	90	78	78	75
	15	22	76	85	85	86	85
	7,5	102	64	83	80	99	106
	15	102	74	85	92	104	116
	7,5	182	77	83	87	96	110
	15	182	81	96	95	109	122
Provsträcka 2	7,5	64	78	91	70	73	84
	30	64	96	99	89	99	106
	7,5	144	70	74	82	79	83
	30	144	82	96	101	102	108
	7,5	224	91	82	97	92	87
	30	224	115	96	107	109	97

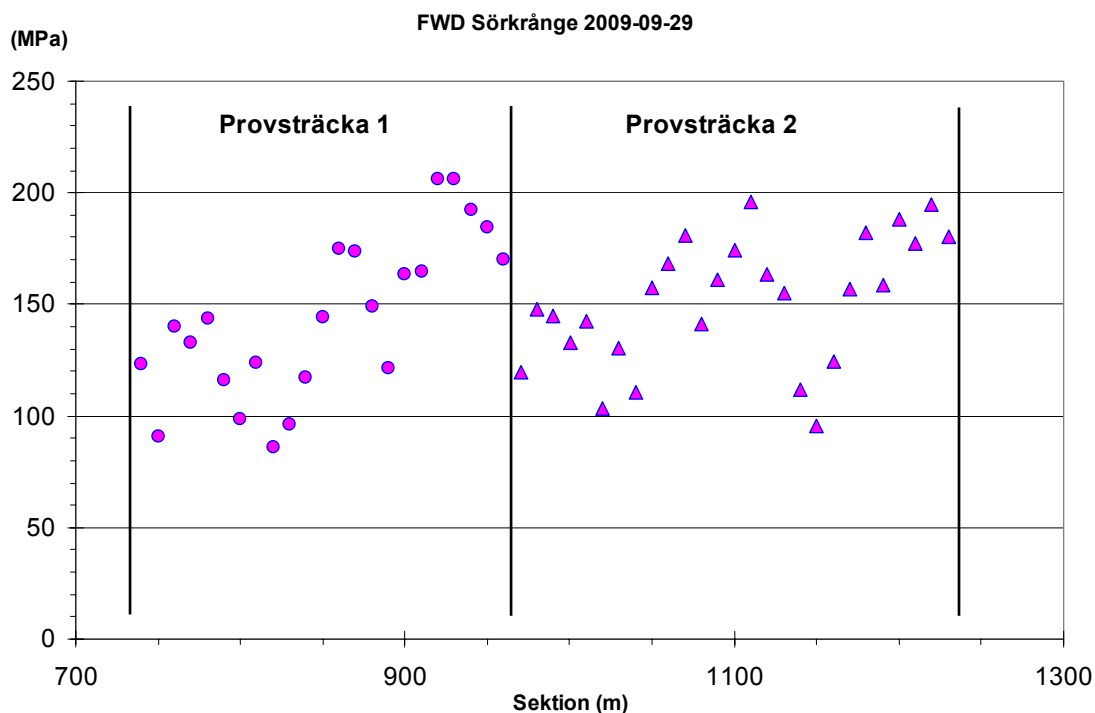
3.4 Kvarvarande puzzolana egenskaper – halt av fri kalciumoxid

De prov som innehöll den högsta andelen aska valdes ut för bestämning av andelen fri CaO. Det var dock inte möjligt att få något tydligt resultat från bestämningen eftersom det inte gick att få en klar lösning från vägproverna efter återloppskokning och filtrering och det därför inte gick att urskilja något tydligt färgomslag vid titreringen.

3.5 Provsträckornas styvhet

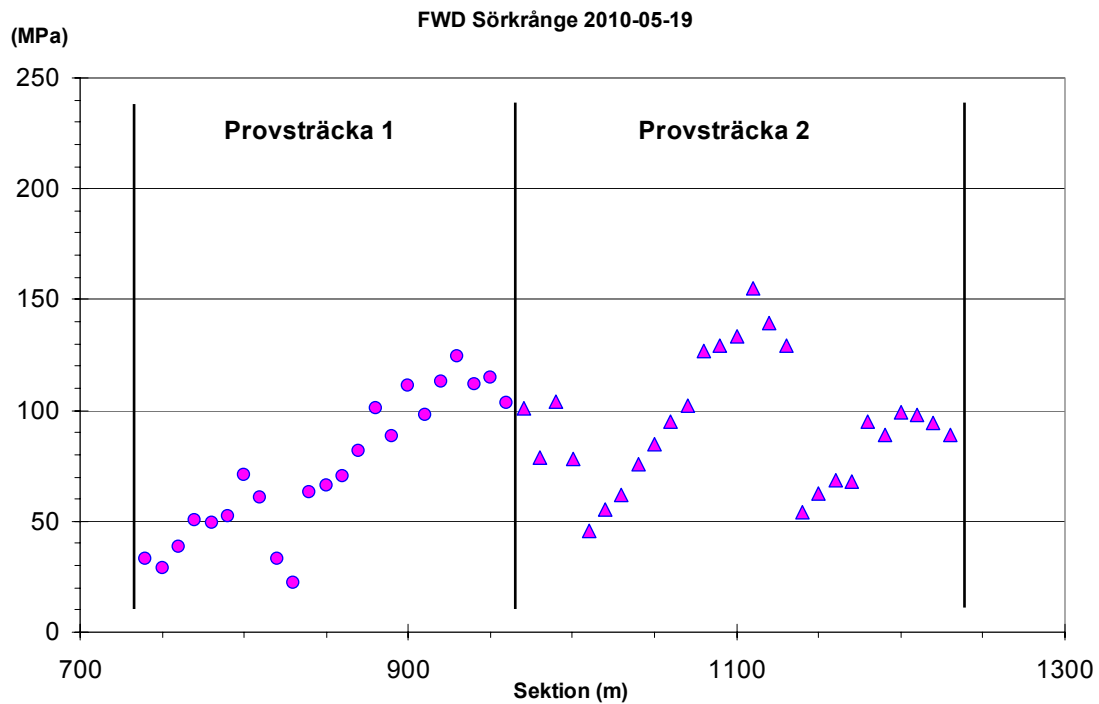
Resultatet från 2009 års mätning visade att styvheten längs med provsträckorna varierade mellan 86 och 206 MPa. I provsträcka 1 uppmättes styvheter 86–206 MPa och i provsträcka 2 uppmättes styvheter 96–196 MPa (Figur 17).

Vid mätningen 2010 var provsträckornas styvhet överlag lägre än vid den första mätningen. Styvheten varierade då mellan 22 och 155 MPa. I provsträcka 1 uppmättes styvheter 22–124 MPa och i provsträcka 2 uppmättes styvheter 46–155 MPa (Figur 18).



Figur 17. Styvheten för hela konstruktionen i mätpunkter längs provsträckorna, utvärderade från fallviktsmätningar 29 september 2009. Sträckorna är förstärkta enligt avsnitt 2.4.

Figure 17. Stiffness (surface modulus) for the whole construction in points along the test sections, evaluated from FWD measurements on September 29th 2009. The structures are reinforced according to chapter 2.4.



Figur 18. Styvheten för hela konstruktionen i mätpunkter längs provsträckorna, utvärderade från fallviktsmätning 19 maj 2010. Sträckorna är förstärkta enligt avsnitt 2.4.

Figure 18. Stiffness (surface modulus) for the whole construction in points along the test sections, evaluated from FWD measurement on May 19th 2010. The sections are reinforced according to chapter 2.4.

4 Resultatanalys

4.1 Materialegenskaper

4.1.1 *Analys av flygaskans egenskaper*

Skjuvhållfasthetstestet visade att om askan har en måttlig kontakt med vatten innan användning kommer den att kunna hanteras vid utläggning och inblandning. Vid testet härdade inte askan ihop utan gick att smula sönder med fingrarna. Effekten av askans härdande egenskaper hade troligtvis minskat eftersom hydratiseringen redan hade startat.

4.1.2 *Analys av ask-grusblandningarnas egenskaper*

Flygaskans puzzolana egenskaper medförde att proverna fick en högre hållfasthet efter den accelererade härdningen i koldioxidatmosfär. Den högre inblandningen av flygaska (30 %) gav då en tryckhållfasthet på 9,66 MPa efter härdningen. Efter 12 frys-tö-cykler minskade tryckhållfastheten från 6,71 MPa till 5,59 MPa för proverna med 20 % askinblandning men för proverna med 30 % askinblandning ökade tryckhållfastheten från 9,66 MPa till 13,94 MPa efter frys-tö-försöken. Ökningen i tryckhållfasthet efter frys-tö-växlingarna kan eventuellt förklaras med att proverna inte hade härdat färdigt vid första mätningen och därmed att blandningen inte hade uppnått brottgränsen vid den första mätningen. Den härdade flygaskan utan inblandning av vägmateriäl tålde en hög tryckbelastning innan brottgränsen nåddes (38 MPa). (Figur 9)

Baserat på Munde et al. (2006) [6] och Lahtinen (2001) [19] medförde provernas höga hållfasthet, både efter härdning och efter frys-tö-cykler, att vägen uppgraderades utan andra bindemedel än askan. En askinblandning på 30 % valdes i vägen.

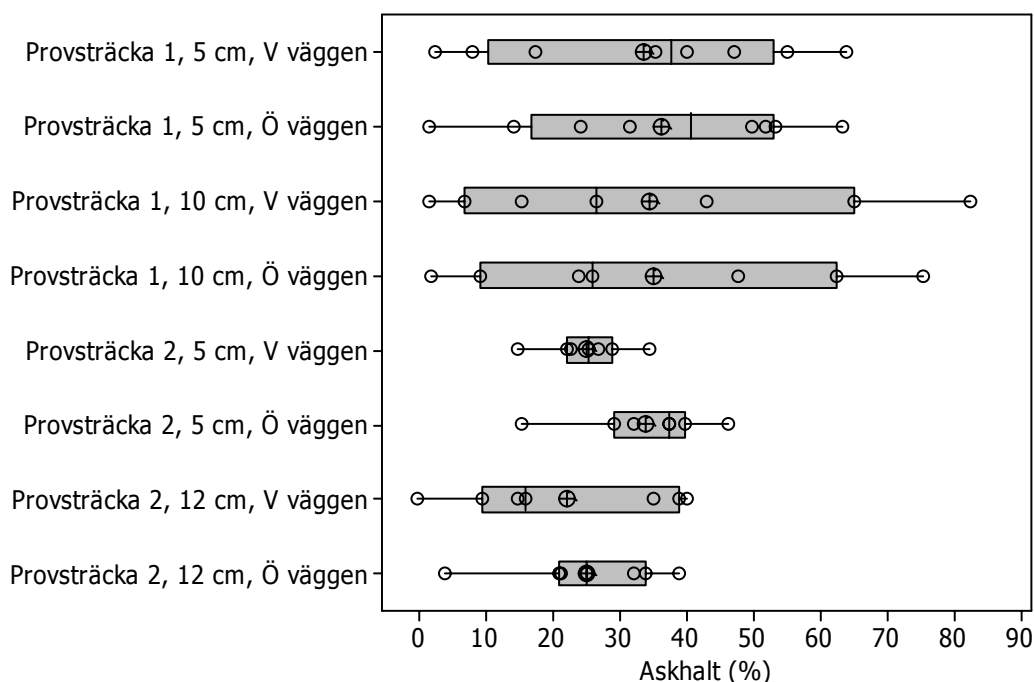
4.2 Analys av vägblandningens homogenitet

4.2.1 *Askhalt*

Den procentuella inblandningen av aska i bärlagret varierade över vägen. I medeltal varierade askhalten mellan 22 och 36 % (riktvärdet var 30 %) vilket kan anses acceptabelt med den inblandningsmetod som användes (Figur 19). I den ursprungliga vägkroppen fanns relativt hög halt av stenar upp till 30 – 40 cm. Stenarna samlades vid fräsningen i frästrumman och kan ha påverkat omblandningen av det finare materialet negativt.

Ur lådagrammen i Figur 19 kan utläsas att det är en större variation i askhalten tvärs över vägen i provsträcka 1 än i provsträcka 2. Det är också större spridning i askhalten på det större djupet i ask-gruslagret vilket kan tolkas som att inblandningen av askan i gruset blev sämre med djupet. Inget enskilt värde i respektive provserie avviker så pass

mycket från de övriga värdena att det räknas som en uteliggare (uteliggare = 1,5 ggr lådans längd).



Figur 19. Jämförande lådagran över askhalten i vägprover från tvärsnitt av provsträcka 1 och 2, tagna 5 respektive 10–12 cm under slitlagret.

Figure 19. Boxplots of the ash content in road samples from cross section in test sections 1 and 2. Samples are taken at a depth of 5 and 10–12 cm respectively below surface course.

4.2.2 Mikrostruktur

Bristen på tydlig struktur, t.ex. partikelorientering, i vägens riktning tyder på relativt svag mekanisk bearbetning i den riktningen. Utläggning, fräsning och hyvling innebar ingen tydlig strukturering i längdriktningen. Tunnslipen är genomdragna av ett påfallande stort antal sprickor. Det kan inte uteslutas att en del sprickor har tillkommit i samband med provbehandlingen men sprickigheten kan också vara ett resultat av en viss elasticitet i materialet vilket skapat en typ av avlastningssprickor i samband med trafik. Ingen tydlig skillnad mellan hjulspår och vägens mitt har dock kunnat upptäckas.

4.2.3 Densitet – packningsgrad

I de flesta mätpunkterna ökar vägens densitet och därmed dess packningsgrad med djupet (Tabell 6, 7 Figur 16, Bilaga D Figur 24). Den högre packningsgraden i de djupare punkterna kan tyda på att vägen under uppgraderingen inte har frästs till önskat djup och därmed att det djupare vägmaterialet inte är uppluckrat. Enligt Munde et al.,

(2006) [6] bör packningsgraden vara minst 92 % för att vägkonstruktionen ska få bra egenskaper. Endast ett fåtal av de uppmätta grundare provpunkterna i Sörkrångevägen når en sådan packningsgrad. Munde et al., (2006) [6] håller produktens vattenkvot som mycket viktig för att uppnå en hög packningsgrad. Enligt tidigare laboratieförsök var ask-grusblandningens optimala vattenkvot 25 % (Tabell 4). Vattenkvoten i fält vid vägens uppgradering mättes till 13–15 %. Maskinhaverier vid vattningen av vägen omöjliggjorde ytterligare vattning. Vägens låga vattenkvot tillsammans med otillräcklig maskinell packning är troligtvis orsaker till den låga packningsgraden.

Vägens packningsgrad är relativt lika i provsträckornas längsgående profiler. Två provpunkter på provsträcka 2 (224 m och 264 m) har en högre packningsgrad än de övriga punkterna. Dessa punkter är belägna vid platsen där askan mellanlagrades och där maskinerna stod uppställda under vägens uppgradering. Dessa punkter har därför haft en högre belastning än de övriga och därmed erhållit en högre packningsgrad.

Även i provsträckornas tvärgående profiler är packningsgraden relativt lika. Vägen är inte mer packad i hjulspåren än i de övriga punkterna vilket speglar vägens låga trafikering. Provsträcka 1 har, i två punkter (102 resp. 182 m), en hög packningsgrad i höger hjulspår och höger vägkant. Vägens geometri (kurva) vid mätpunkterna kan vara en förklaring.

4.3 Kvarvarande puzzolana egenskaper – halt av fri kalciumoxid

Det var svårt att analysera innehållet av kalciumoxid i vägproverna. Resultaten blev därför svårtolkade. Det kan antingen bero på att all fri CaO var hydratiserad till $\text{Ca}(\text{OH})_2$ eller att analysmetoden inte är tillämpningsbar på prover där askan är uppblandad med grusmaterial. De puzzolana reaktionerna i askan och mellan ask- och gruspartiklar, som kräver att $\text{Ca}(\text{OH})_2$ finns närvarande, kan fortgå under en lång tid efter att askan blandats in i vägmaterialet speciellt om temperaturen i vägbanan är låg.

Förhållandet mellan kalciumoxid och kiseldioxid i askan (1,53) är precis på gränsen för att materialet ska klassas som hydrauliskt. Ett hydrauliskt material bör ha en kvot på minst 1,5 och innebär att kalciuminnehållet är tillräckligt högt för att materialet ska självhärda utan extra tillsatser av bindemedel.

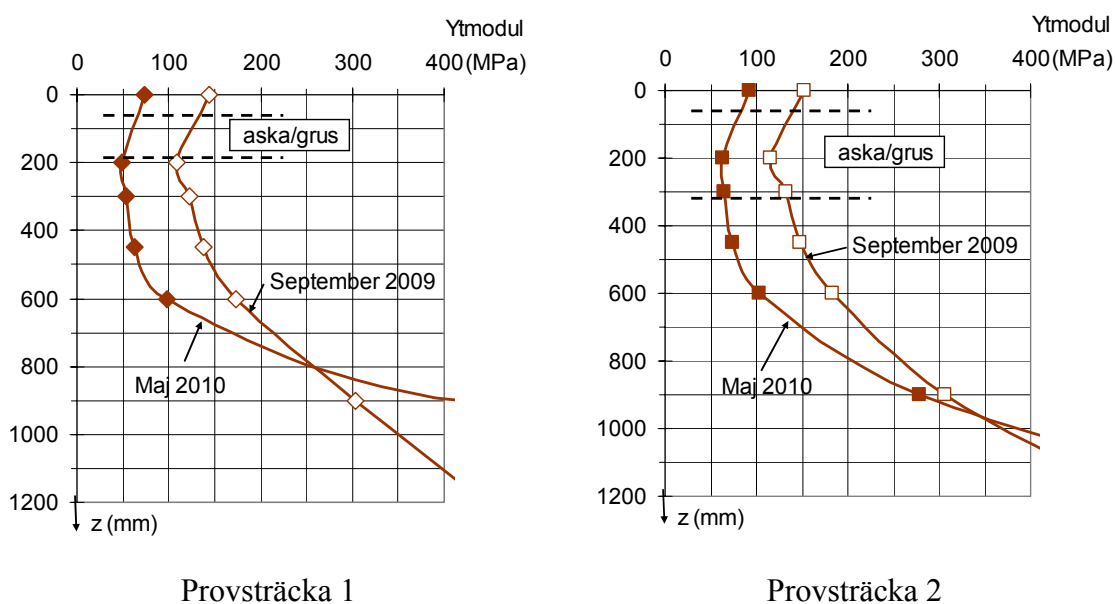
4.4 Provsträckornas styvhetsutveckling

Provsträckornas mätresultat vid de båda mättillfällena hösten 2009 och våren 2010 har jämförts för att visa styvhetsutvecklingen och för att visa eventuella skillnader mellan 12 cm och 24 cm askinblandning.

Den parameter som har jämförts är beräknad ytmodul för hela sträckan. Varje mättillfälles värde utgör medelvärdet för 23 mätpunkter i provsträcka 1 och 27 mätpunkter i provsträcka 2.

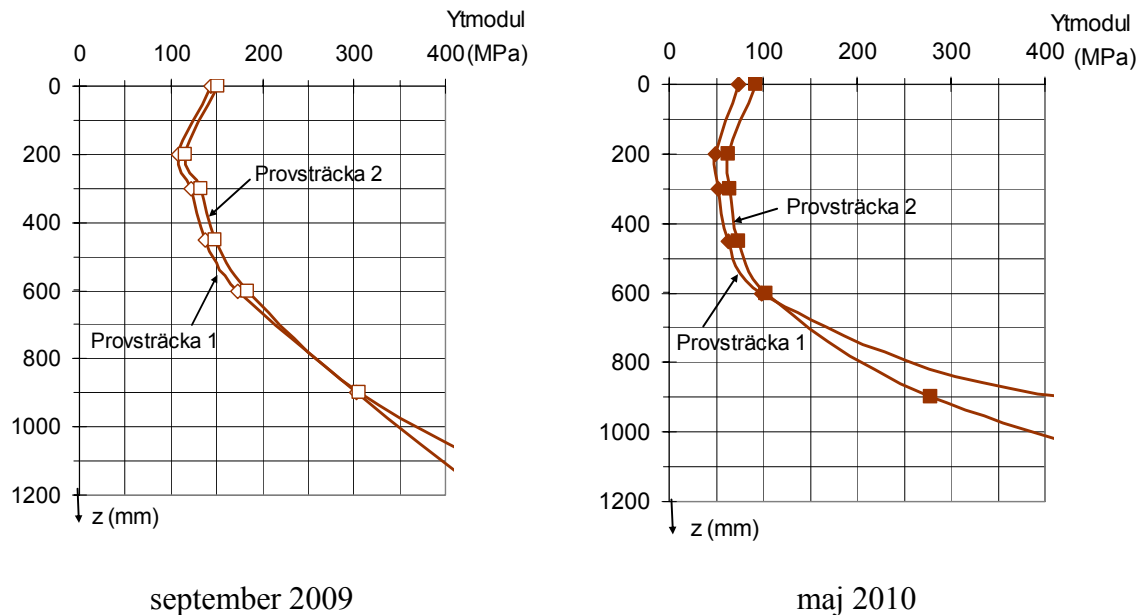
Vid den andra mätningen, i maj 2010, hade styvheten i båda provsträckorna minskat mycket jämfört med den första mätningen (Figur 20). Det är naturligt med tanke på att tjällossningen inte var avslutad och att vägen därmed innehöll mer vatten än på hösten. Styvheten i provsträcka 2 hade emellertid inte minskat lika mycket som den i provsträcka 1. Vid den första mätningen hade provsträcka 2 marginellt högre styvhet, 5–8 % högre, än provsträcka 1. Vid den andra mätningen hade provsträcka 2 mellan 17 och 27 % högre styvhet än provsträcka 1 (Figur 21).

Det verkar som om provsträcka 2, med dubbelt så stor askinblandning, utvecklas bättre än provsträcka 1.



Figur 20. Provsträckornas styvhetsutveckling. Ytmoduler utvärderade från fallviktsmätningar. Medelvärde av 23 resp. 27 mätpunkter. Sträckorna är förstärkta enligt avsnitt 2.4.

Figure 20. Stiffness change of the test sections. Surface moduli evaluated from FWD measurements. Mean value of 23 and 27 points. The sections are upgraded according to chapter 2.4.



Figur 21. Jämförelse mellan provsträckornas styvhet. Ytmoduler utvärderade från fallviktsmätningar. Medelvärde av 23 resp. 27 mätpunkter. Sträckorna är förstärkta enligt avsnitt 2.4.

Figure 21. Comparison between stiffnesses of the test sections. Surface moduli evaluated from FWD measurements. Mean value of 23 and 27 points. The sections are upgraded according to chapter 2.4.

Vid provbelastning med fallviktsapparat och utvärdering av fallviktsresultat kan en del osäkerhetskällor förekomma. Dessa har undvikits så långt som möjligt. Samma utrustning har använts vid båda mättillfällena och utvärderingen har gjorts med hjälp av samma lagermodell och samma lagertjocklekar. Båda mätningarna har utförts enligt Vägverkets metodbeskrivning [17], till exempel har hänsyn tagits till lastens reella storlek och till temperaturen vid mättillfället. Om mätning görs på mycket styva material blir deflektionerna mycket små och mätresultatet osäkert. Detta kan vara aktuellt för undergrunden i denna väg. De två hittills utvärderade mätningarna har utförts vid olika tid på året (september och maj), och skillnader kan dessutom förekomma mellan åren när det gäller temperatur eller vattentillgång i undergrunden. Det förekommer sannolikt stora variationer i övriga lagers egenskaper, till exempel i undergrunden.

5 Slutsatser

Både laboratorie- och fältstudierna visar att flygaskan från Ortviken är väl lämpad för stabilisering av grusvägar. Laboratorieundersökningarna visade att vägmaterialet fick en väsentlig hållfasthetsförbättring när askan blandades in.

Den använda tekniken för inblandning av aska i befintligt gruslager fungerade tillfredsställande även om den uppmätta homogeniteten varierade. Den planerade inblandningen med 30 viktsprocent aska lyckades och den uppmätta askhalten varierade mellan 34 och 36 % för provsträcka 1 och mellan 22 och 34 % för provsträcka 2. Eftersom vägblandningens homogenitet varierade kan inblandningstekniken förbättras.

Vägen uppnådde inte önskad packningsgrad. Troligtvis beror detta på för låg vattenkvot i ask-grusblandningen i kombination med otillräcklig maskinell packning vid uppgraderingen av vägen.

Inblandningen av aska var sämre och packningsgraden var högre på djupet. Det innebär troligtvis att ihopfräsningen av aska och grus inte nådde önskat djup.

Utvärderade styvhetsmoduler från fallviktsmätningarna pekar på att provsträcka 2, med dubbelt så stor askinblandning (24 cm opackad flygaska), utvecklas bättre än provsträcka 1 (12 cm opackad flygaska) när det gäller hållfasthet. Fallviktsmätningar ger god information om skillnaden mellan provsträckornas styvhet men har för låg upplösning för att ge information om homogeniteten i ask-grusblandningen.

Jämförelser mellan provsträckorna och referenssträckorna redovisas i kommande rapporter under 2011.

6 Rekommendationer och användning

Sörkrångevägens låga packningsgrad tyder på att vattningen av vägen blev otillräcklig vid uppgraderingen. För att förbättra vägens packning och därmed vägens egenskaper är det därför av stor vikt att asklagret vattnas så att materialets optimala vattenkvot uppnås.

Vägen packades vid fem överfarter med en sex tons vibrovält. Denna packning var inte tillräcklig för att uppnå hög packningsgrad. Fler överfarter eller en kraftigare vält rekommenderas.

Vid uppgraderingen lades askan ut med lastbil. Det var svårt att lägga ut ett jämnt asklager vilket medförde ojämn blandning av grus och aska. Genom att använda en utläggare till askan erhålls troligtvis en jämnare och mer kontrollerad inblandning.

För att kunna utvärdera askinblandningens effektivitet bör de ingående materialen karakteriseras innan uppgraderingen. Då kan specifika ämnen identifieras vars halter sedan kan användas för att avgöra blandningens homogenitet.

7 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Ytterligare fallviktsmätningar bör utföras på Sörkrångevägen för att följa om provsträcka 2 med dubbelt så stor askinblandning fortsätter att utvecklas bättre än provsträcka 1 och även för att jämföra prov- och referenssträckornas utveckling. Hittills har mätningar gjorts hösten 2009, samt våren och hösten 2010.

Inblandningstekniken behöver förbättras eftersom homogeniteten i vägen varierade en del och eftersom fräsdjupet troligtvis inte var i enighet med det planerade.

De utvärderingstekniker som har testats inom denna studie skulle kunna nyttjas för att skapa mer kunskap kring andra befintliga objekt där materialblandningar använts och på så sätt öka kunskapsutbytet från dessa.

Det genomförda askinblandningsförsöket i Sörkrånge är, enligt författarnas bedömning, ett relevant exempel på materialkombination och teknik, men för att skapa generell förståelse för processen krävs flera undersökningar av olika materialkombinationer, tekniker och vägutföranden.

8 Litteraturreferenser

- [1] SMHI Klimatindexkartor – Differenskartor, <http://www.smhi.se> 2006
- [2] Mácsik J., Flygaska som förstärkningslager i väg. Värmeforsk Rapport 949 Stockholm 2006
- [3] Mácsik J., Svedberg B., Skogsbilvägsrenovering av Ehnsjövägen, Hallstavik. Värmeforsk Rapport 968 Stockholm 2006
- [4] Mácsik J., Erlandsson Å., Wexell B-A., Flygaska–Grönlutslamstabiliserad skogsbilväg – Fallstudie Iggesund. Värmeforsk Rapport 1101 Stockholm 2009
- [5] Thurdin R.T., van Hees P.A.W., Bylund D., Lundström U.S. Bio fuel ash in a road construction: Impact on soil solution chemistry, *Journal of waste Management*, 26 (6): 599-613 2006
- [6] Munde H., Svedberg B., Mácsik, J., Maijala A., Lahtinen P., Ekdahl P., Nerén J. Handbok; Flygaska i mark och vägbyggnad, Grusvägar Statens geotekniska institut, SGI. Information 18:4 / Luleå tekniska universitet, LTU 2006
- [7] Lahtinen P., Jyrävä H., Maijala A., Mácsik J., Flygaskor som bindemedel för stabilisering av grusmaterial. Värmeforsk Rapport 918 Stockholm 2005a
- [8] Lahtinen P., Maijala, A., Mácsik, J., Produkter baserade på blandningar av flygaska och fiberslam (fiberaskor) för vägbyggande. Värmeforsk Rapport 915 Stockholm 2005b
- [9] Mácsik J., Svedberg B., Lenströmer S., Nilsson T., FACE Flygaska i geotekniska anläggningar, Etapp 1: Inventering/Tillämplighet Värmeforsk Rapport 870 Stockholm 2004
- [10] Svedberg B., Ekdahl P., Mácsik J., Maijala A., Lahtinen P., Hermansson Å., Knutsson S., Edeskär T., FUD – SALA Provsträcka med stabilisering av obundna lager Värmeforsk Rapport 1055. Stockholm 2008
- [11] Zhou H., Smith D.W., Sego D.C. Characterization and use of pulp mill fly ash and lime by-products as road construction amendments, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27 (3): 581-593 2000
- [12] Mulder E., A mixture of fly ashes as road base construction material, *Waste Management*, 16 (1–3): 15–20 1996
- [13] Taylor HFW; "Cement Chemistry", Second edition, Thomas Telford Publishing, London, Storbritannien, 1997
- [14] Fjällberg L., Lagerblad B., Mossberg Bustnes H., Bjurström H., "Styrd utlakning ur bioaskor som sprids i skogsmark" Värmeforsk Rapport 940 Stockholm 2005

[15] Maurice C., Lagerkvist A.; ”Utveckling av bottentätning för avfallsupplag baserad på vedaska”, FoU 146, Stiftelsen REFORSK, 1998

[16] Vägverkets publikation 1993:26 Bestämning av densitet och vattenkvot med isotopsmätare Metodbeskrivning 605:1993

[17] Vägverkets publikation 1998:80 Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat Metodbeskrivning 112:1998 Vägverket, Borlänge 1998

[18] Vägverkets publikation 2000:29 Bearbetning av deflektionsdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat Metodbeskrivning 114:2000 Vägverket, Borlänge 2000

[19] Lahtinen P., Fly Ash Mixtures as Flexible Structural Materials for Low-Volume Roads, Doctoral thesis for Helsinki University of Technology Finnra Reports 70/2001

Bilagor

A Analys och provningsmetoder

A.1 Fallkonförsök

Askans hårdande egenskaper undersöktes genom att mäta förändringen i askans skjuvhållfasthet över tiden efter att den hade blandats med vatten. Försöket utfördes som fallkonförsök enligt Svensk standard SS 027125. Askan blandades med vatten till en vattenkvot på 54 % vilket var dess optimala vattenkvot erhållen från tidigare försök. Därefter fördes den över till en 10 cm hög plastcylinder med en diameter på 5 cm. Askan packades endast lätt genom inskakning varefter ytan slätades till med en sked. Skjuvhållfastheten uppmättes efter 0,5, 1, 2, 4, 6 och 24 timmar. Tre mätningar gjordes vid varje tidpunkt.

A.2 Torrsubstans och glödningsförlust

Askans torrhalt (TS) och glödningsförlust (GF) uppmättes enligt Svensk standard SS 028113. Torrhalten bestämdes gravimetriskt genom vägning av provet före och efter torkning i 24h vid 105°C. Glödningsförlusten bestämdes som viktförlusten av provet efter att det glödgas vid 550°C i 2h.

A.3 pH, redox och konduktivitet

Askans pH, konduktivitet och redoxpotential mättes på uppslammat material i förhållandet material–vatten 1:2 efter 30 minuters omblandning.

A.4 TOC

Askans innehåll av kol bestämdes med TOC-SSM-5000A (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) i enighet med Europeisk och Svensk standard (EN 13 137, Metod B). Ungefär 50 mg prov vägdes in i ett porslinskepp. Totalt kol (TC) bestämdes genom oxidation av kol till CO₂ vid 900°C. Den bildade koldioxiden mäts med infrarödspektrometri (NDIR – non dispersive infrared absorbance). Vid bestämningen av oorganiskt (IC) kol drivs oorganiskt kol bort genom tillsats av koncentrerad saltsyra (HCl). TOC bestäms sedan genom oxidation av kol till CO₂ genom förbränning av resterande prov vid 900°C. Oorganiskt kol (IC) bestäms genom differensen mellan TC och TOC.

A.5 Fri kalciumoxid

Fri kalciumoxid i askan/vägprov bestämdes enligt Svensk standard SS-EN 450-1. Bestämningen gjordes på aska/vägprov som mortlats och siktats till < 0,071 mm. 1,0–1,5 g prov återloppskokades i 3h tillsammans med 12 ml etylacetoacetat och 80 ml 2-butanol i en 250 ml rundkolv. En absorbtionstub fylld med NaOH anslöts till övre delen av återloppskylaren för att skydda innehållet i kolven från atmosfärens koldioxid. Efter 3h filtrerades den varma lösningen. Filtratresterna sköljdes med 50 ml 2-propanol. Filtratet titrerades med 0,1 M HCl till gult färgomslag med bromfenolblått som

indikator. Mängden fri kalciumoxid beräknades ur förbrukad volym HCl samt mängden invägt prov.

A.6 Syraneutraliserande kapacitet

Askans syraneutraliserande kapacitet (ANC) bestäms genom titrering av 1 g prov, uppslammat i 110 ml vatten, med 0,1 M HCl till pH 8,3 och pH 4,5.

A.7 Totalhalt av element

Totalanalys av grundämnen bestämdes på uppslutet prov med ICP-teknik (ICP-AES (optisk emissionsspektrometri med induktivt kopplad plasma), ICP-QMS (quadropol masspektrometri med induktivt kopplad plasma), ICP-SFMS (masspektrometri med induktivt kopplad plasma enligt sektortekniken) eller kombinationer av dessa). Analyserna utfördes av ALS Scandinavia AB enligt analyspaket MG-2. För bestämning av As, Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, S och Zn torkades proverna vid 50°C och upplöstes i salpetersyra/saltsyra/fluorvätesyra i en sluten teflonbehållare i mikrovågsugn. Övriga ämnen bestämdes efter smältning med litiummetaborat följt av upplösning i utspädd salpetersyra (HNO₃).

A.8 Laktest

Enstegs laktest vid L/S (liquid to solid ratio) 10 L/kg TS användes för att bestämma utlakningen av grundämnen, löst totalt kol (TC) och klorid i vatten från askan. Laktestet utfördes enligt SS EN 12457-2. Till laktestet användes 1-liters polyetylen flaskor. 90 g aska (torr vikt) skakades med 900 ml destillerat vatten i 24±1h. Till lakningen användes en rotationsutrustning som roterade med 7 rpm. Suspensionen av material och vatten filtrerades genom 45 µm membranfilter. Redoxpotential, pH och konduktivitet uppmättes på filtraten. Lakvattenproverna förvarades sedan i frysrum vid -20°C innan övriga analyser.

Elementinnehållet i filtraten bestämdes på surgjorda prover (1 ml HNO₃/100 ml), W undantaget. Se uppslötts med HCl innan analys. Ag konserverades med HCl före analys. Analys av Hg utfördes med AFS (atomfluorescens-spektrometri). Övriga element analyserades med ICP-AES eller ICP-SFMS. Analyserna utfördes av ALS Scandinavia AB enligt analyspaket V-3a.

Analys av totalt löst kol i filtraten gjordes med TOC-VCPH/CPN (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) i enighet med Europeisk och Svensk standard (EN 1484). Totalt löst kol bestäms genom oxidation av kol till CO₂ genom förbränning vid 680°C. Den bildade koldioxiden mättes med infrarödspektrometri (NDIR).

Klorid och sulfat i lakvattnet analyserades spektrofotometriskt (QuAatro, Bran+Luebbe).

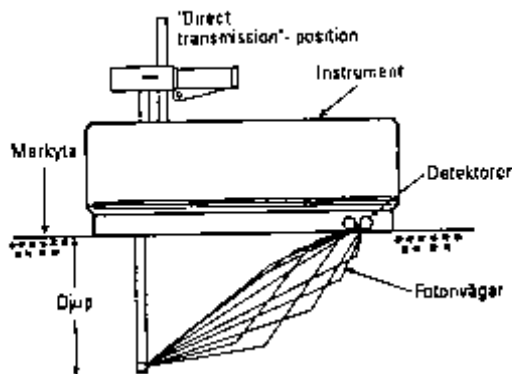
A.9 Vägprovernans homogenitet

Vid ankomsten till LTU vägdes de utmejslade vägproverna innan de torkades till konstant vikt vid 30°C, vilket tog 12 dagar. Efter torkning krossades alla askklumpar som var större än 2 mm i vart och ett av proverna. Proverna siktades därefter genom en 2 mm sikt. Fraktionen under 2 mm användes för fortsatta analyser.

Totalhalt av Zn i fraktionen mindre än 2 mm bestämdes med XRF (röntgenfluorescensspektrofotometri). Tre mätningar på varje prov gjordes och där medelvärdet sedan användes för fortsatta beräkningar. Med hänsyn till andelen material som var större än 2 mm beräknades hela provets Zn-halt vilken sedan relaterades till askhalt i vägproverna.

B Densitetsmätningar

Densitet in situ har mätts med isotopmätare. En sådan mätning utnyttjar det packade materialets egenskap att kunna dämpa gammastrålning. Det finns två olika typer av isotopmätare – reflekterande och transmitterande. I detta projekt har en transmitterande mätare använts. Den har strålningskällan placerad i spetsen på en sond som trycks ned ca 30 cm i lagret och en detektor på undersidan av mätaren (Figur 22).



Figur 22. Mätning med transmitterande isotopmätare [16]

Figure 22. Measurement by means of direct transmission [16]

Isotopmätare används ofta för att bestämma densitet och även vatteninnehåll i ytlager i jordmaterial och krossat bergmaterial. Mätning kan utföras på material med partikelstorlek ≤ 125 mm. Djupverkan hos instrumentet är densitet till max 30 cm och vattenkvot till max 7–8 cm. I detta projekt har mätning gjorts på två djup inom 30 cm för att hitta densitetsvariationer.

B1 Mätprincip

Den våta densiteten bestäms genom mätning med en gammastrålkälla och en gammadetektor på det lager som ska undersökas s.k. direkt transmissionsmätning. Intensiteten hos den strålning som registreras är huvudsakligen beroende av densiteten i materialet som undersöks. Den registrerade strålningsintensiteten översätts till uppmätt våt densitet med hjälp av kalibrering mot olika block med känd densitet.

Vatteninnehållet bestäms med hjälp av en strålkälla som avger snabba neutroner och en detektor. När de snabba neutronerna sänds ut i omgivningen kolliderar de med väteatomer i materialet, bromsas upp (förlorar energi) och övergår till att bli långsamma eller termaliserade neutroner. Dessa registreras med en neutrontektor och antalet registrerade långsamma neutroner omräknas till ett värde på vatteninnehållet per m^3 . Vatteninnehållet står i relation till antalet snabba neutroner, som bromsats upp och omvandlats till långsamma eller termaliserade neutroner. Eftersom det är väteatomerna

som ger mätresultatet kan allt material, som innehåller väte och finns inom mätområdet, påverka mätvärdet. Inverkan är störst närmast ytan och avtar med ökande djup.

En mätning tar normalt en minut och innebär avläsning av värdet på våt densitet, vatteninnehåll, torrdensitet och vattenkvot.

B2 Fördelar/Felkällor/Att observera

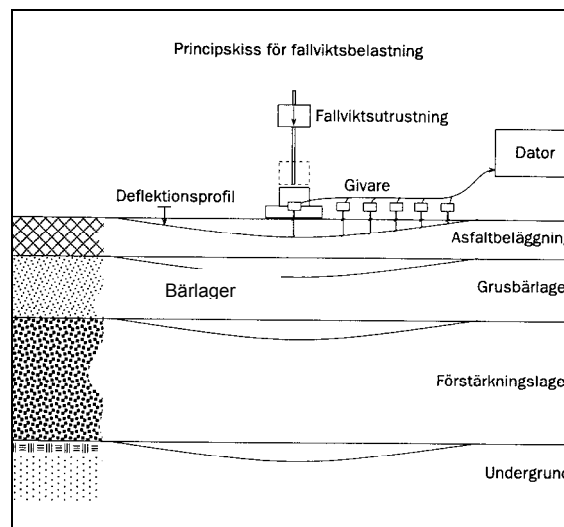
Fördelar med isotopmätning jämfört med vattenvolymetrisk mätning, som är den andra vanliga metoden för densitetsmätning, är snabbare mätning och liten åverkan jämfört med att gräva upp materialprov. En mätning med vattenvolymeter tar ca 45 minuter, till det kommer tiden för vägning och torkning av materialet. Densitetsmätning med isotopmätare tar ca 5–15 minuter.

Den vattenkvot som beräknas av isotopmätaren är inte exakt, utan mer lämpad för relativa jämförelser. Man kan komplettera med en fullständig vattenkvotsbestämning med materialprov som torkas och vägs och använda den som "kalibrering".

Densiteten in situ anger endast lagrets tillstånd i den punkt där mätningen gjorts och endast till det djup som mätningen representerar.

C Fallviktsmätningar

Fallviktsmätning är ett hjälpmedel för att bedöma vägars eller vägmateriallagers styvhetssegenskaper och heter egentligen Provb belastning med fallviktsapparat. Vid provbelastningen belastas vägytan av en vikt som får falla ned på en belastningsplatta som vilar på vägen (Figur 23).



Figur 23. Princip för provbelastning med fallviktsapparat [17].

Figure 23. Principle of Falling Weight Deflectometer, FWD [17].

C1 Mätprincip

Under belastningen registreras vägytans maximala nedsjunkning eller deflektion av givare, dels i belastningscentrum, dels i ett antal punkter på valda avstånd därifrån. Vikten faller ned på ett fjädersystem ovanpå belastningsplattan och plattan överför kraftpulsens till vägen. Kraftpulsens storlek beror av viktens massa, fallhöjden, fjädersystemets egenskaper och vägkroppens styvhets. Storleken på deflektionerna och hela ”deflektionsprofilens” utseende är en funktion av styvhetserna och tjocklekarna hos de lager som påverkas av belastningen. Deflektionen i belastningscentrum påverkas av alla lager inom lastens djupverkan, medan deflektionen under den yttersta givaren påverkas främst av förhållandena i undergrunden. Deflektionsprofilen kallas ibland för sjunktratt.

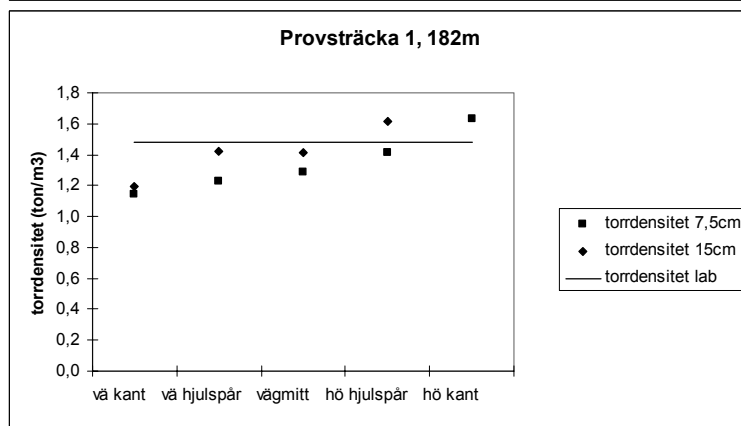
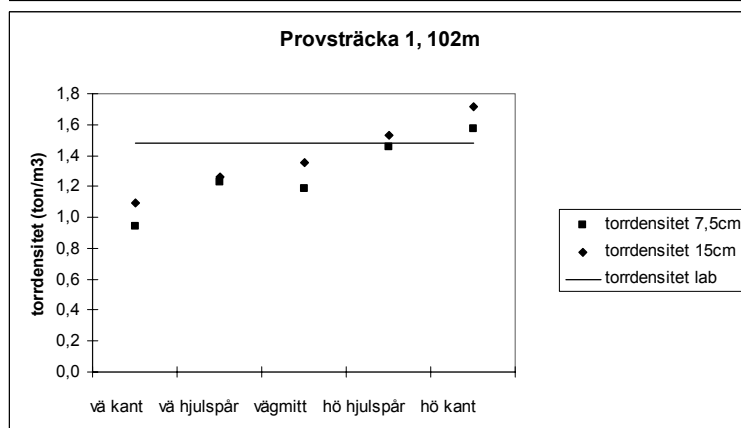
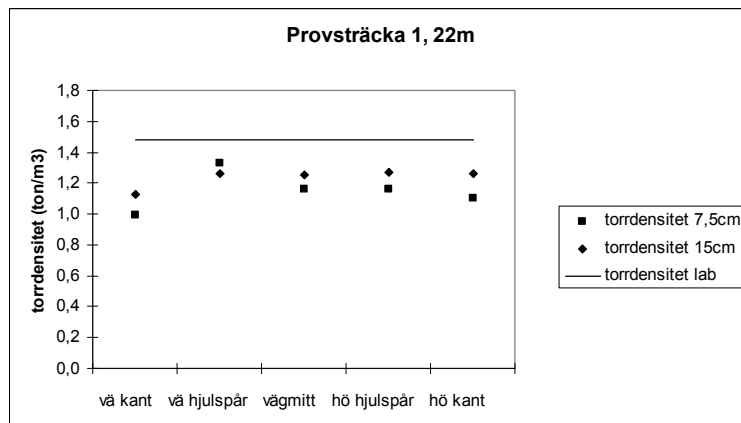
Om lagertjocklekarna i en konstruktion är kända kan de olika lagrens styvheter itereras fram med hjälp av ett datorprogram och de uppmätta deflektionernas storlek [18]. Vid kontroll av hållfasthetsutvecklingen görs upprepade mätningar och de utvärderade lagerstyvhetserna, s.k. lagermoduler, jämförs. För en relativ jämförelse mellan konstruktioner kan även ytmodulen eller medelmodulen för olika djup användas.

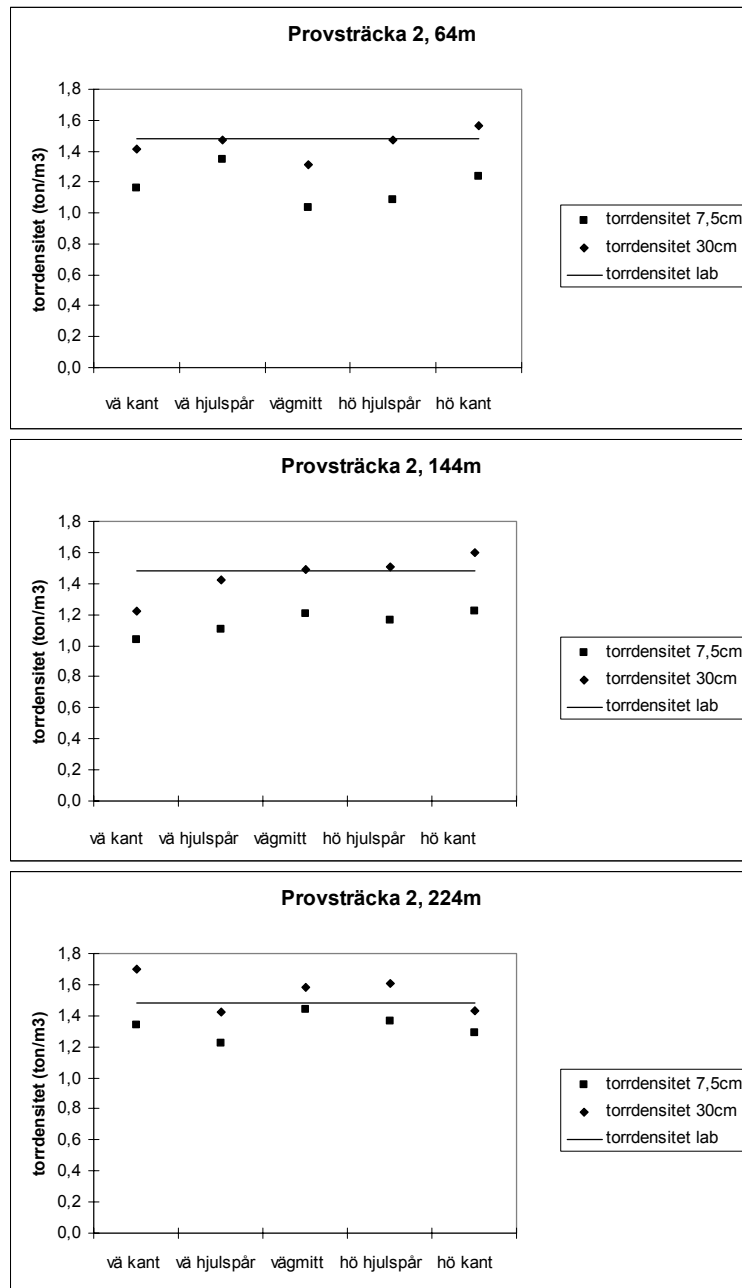
C2 Fördelar/Felkällor/Att observera

Observera att det finns fallviktsapparater av olika fabrikat och att tekniskt viktiga egenskaper såsom kraftpulsens längd och form kan skilja dem åt. Därför bör upprepade mätningar med syfte att följa upp ett vägobjekt utföras med apparater av samma konstruktionstyp. Normalt utförs mätning i höger hjulspår för att fånga den tunga trafikens påverkan på vägen. På färdig vägyta används belastningen 50 kN. På andra ytor, till exempel terrass, bör en mindre last användas. Normalt är belastningsplattans diameter 300 mm. Deflektionsgivarnas antal och placering väljs med tanke på vägkonstruktionen. Trafikverket rekommenderar generellt minst sex givare som placeras på följande avstånd från belastningscentrum: 0, 200, 300, 450, 600 och 900 mm. Mätning ska göras på otjälad väg om inte syftet är att studera just tjällossning. Temperaturen i beläggnings och luften ska mätas vid belastningstillfället, beläggningstemperaturen flera gånger. Det beror på att en asfaltbeläggning styvhet är temperaturberoende och mätresultaten behöver korrigeras till en referenstemperatur.

En fördel med metoden är att den använder en dynamisk last som simulerar en fordonsaxelöverfart. Dessutom är det en snabb, ickeförstörande provning där olika lagers egenskaper kan särskiljas. Den fungerar bra på vägkonstruktioner med alternativa material, men den kan inte användas på för svagt underlag där mätfordonet inte tar sig fram.

D Resultat densitetsmätningar





Figur 24. Densiteten i tvärgående profil för respektive provsträcka och djup. Den heldragna linjen markerar torrdensiteten erhållen från laboratorieförsök.

Figure 24. Density in transverse directions for the test sections. The line marks the density derived from the laboratory tests.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35