

LÅNGTIDSSTUDIE AV ASKSTABILISERAD GRUSVÄG

RAPPORT 2021:723



Långtidsstudie av askstabiliserad grusväg

Utvärdering 10 år efter stabilisering

JENNY VESTIN OCH DÉSIRÉE NORDMARK

ISBN 978-91-7673-723-1 | © Energiforsk januari 2021

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

Förord

Denna rapport är slutrapportering av projekt 2019-052 *Långtidsstudie av askstabiliserad grusväg – utvärdering 10 år efter stabilisering* inom Askprogrammet som bedrivs av Energiforsk. Askprogrammet verkar för att kunskap tas fram för att stimulera användningar av askor så att ingen eller ringa risk för hälsa och miljö på kort eller lång sikt föreligger.

I projektet har en askstabiliserad skogsväg i Sörkrånge utanför Timrå undersökts för att se hur egenskaperna förändrats efter tio år. Dessutom har påverkan på markvattnet undersökts.

Resultaten är viktiga eftersom de visar att ett av de antagna hindren för att använda aska som byggnadsmaterial, nämligen miljöpåverkan, inte nödvändigtvis behöver vara ett hinder för att använda aska som konstruktionsmaterial i vägar.

Arbetet har genomförts av huvudprojektledare Jenny Vestin på Statens geotekniska institut och Désirée Nordmark, Luleå tekniska universitet, LTU.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av:

Stefan Anderson, Skogsstyrelsen

Torsten Wiborgh, Sveaskog

Daniel Ivarsson, Jämtkraft

Stockholm februari 2021

Helena Sellerholm

Områdesansvarig

Termisk energiomvandling, Energiforsk AB

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

För att undersöka om bioflygaska, utan tillsats av övriga bindemedel, kan användas för att förbättra bärigheten hos en skogsbilväg uppgraderades år 2009 en skogsbilväg med bioflygaska från ett regionalt pappersbruk. Projektet var ett samarbetsprojekt mellan Skogsstyrelsen, Statens Geotekniska Institut (SGI) och Luleå tekniska universitet (LTU). Den uppgraderade vägen har två olika provsträckor och fyra olika referenssträckor. Vägens tekniska och miljömässiga egenskaper har undersökts - dels direkt efter uppgraderingen dels sex år efter uppgraderingen. Sammanfattningsvis visar de hittills utförda undersökningarna att bioflygaska har stor potential för att användas som bindemedel i grusvägar.

Föreliggande projekt syftar till att undersöka hur vägens egenskaper har utvecklats i ett längre tidsperspektiv och om de askstabiliserade sträckornas goda egenskaper kvarstår eller har förändrats 10 år efter uppgraderingen. De askuppgraderade sträckorna har jämförts med de konventionellt uppgraderade vägsträckorna och med de tidigare erhållna mätserierna.

Projektets resultat visar att den använda flygaskan har en ringa miljöpåverkan som vägbyggnadsmaterial, förutom en initial utlakning av lösliga salter som avklingar med tiden. De låga halterna av spårämnen i flygaskan tillsammans med en låg spridning av dessa till markvatten gör att ingen toxisk påverkan på växtligheten har kunnat identifierats. Provsträcka 2, med tjockare askinblandning, har en fortsatt påtagligt högre bärighet jämför med referenssträckorna. Provsträcka 1, med mindre askinblandning, har liknande bärighet som referenssträckorna.

Summary

Background

In 2009, Swedish Forest Agency together with Swedish Geotechnical Institute (SGI) and Luleå University of Technology (LTU) initiated a project in which part of a gravel road was upgraded and stabilized with fly ash from a local paper mill. The fly ash contains mainly calcium and silicate oxides and has thus hardening properties which give high compression strength and high bearing capacity.

The upgraded road consists of two different test sections upgraded with fly ash and four different reference sections. Two reference sections (1, 2) were upgraded with gravel and two reference sections (0, 3) were not upgraded at all. During upgrading, ash was milled into the existing road to reach a mixture of 30 % fly ash and 70 % road material. No other additives were used. After compaction and watering, the thickness of the ash-gravel layer in test section 1 was 15 cm and the thickness in test section 2 was 20-25 cm. The fly ash used for upgrading was produced at the paper mill Ortviken in Sundsvall where bark and sludge containing fibres, ash, organic material and microorganisms are burnt in a fluidized bed incinerator.

In summary, the earlier obtained results from 2009 to 2015 showed that the test sections with fly ash had an initial leakage of potassium, sodium, chloride and sulphate but after two years the leakage was similar in the test and reference sections. The test sections had higher stiffness, especially during frost thawing periods.

OBJECTIVES

This project "Long-term monitoring of a road stabilized with biofuel ash" is a complementary study of the same road. The objectives of this project were to study the technical and environmental properties of the road, more than ten years after upgrading. The ash upgraded sections will be compared to the reference sections. The results will show the potential leaching from the road, the uptake of metals in the nearby vegetation and the stiffness development compared to the conventionally upgraded road sections.

Methods

COMPOSITION OF SOIL

Sampling of soil was carried out at three distances from the outer edge of the road (0.5; 1 and 2 meters) at three points at test section 2 and reference section 2, respectively. The samples were taken at a depth of 30 cm. The soil was analysed regarding to dry matter, loss on ignition, water holding capacity, pH, electrical conductivity and elements. The results from the different road sections were compared with each other and related to guideline values for contaminated land [21].

COMPOSITION OF SOIL WATER

Soil water was extracted from the sampled soil using pore water samplers. Water was added to 500 g, dry weight of soil, to 60% of the water holding capacity. Parallel experiments were performed with deionized water and with water acidified to pH 4 with HNO₃ to mimic acid rain. The soil water was analysed for pH, electrical conductivity, elements, chloride and sulphate. The results from the different road sections were compared with each other and related to previous analyses [15] and to relevant guideline values for surface water and drinking water [22, 23].

COMPOSITION OF VEGETATION

Sampling of the vegetation was carried out at two distances from the outer edge of the road (0.5 and 2 meters respectively) at test section 2 and reference section 2. The vegetation was collected from an area (30 * 30 cm) from three test points at each distance (Figure 3). The plant species included in the study are clover (*Trifolium pratense*), ravenwing (*Anthriscus sylvestris*) and mayflower (*Geranium sylvaticum*). Only the parts above ground were included in the sampling to avoid contamination from the soil to the plant material.

STIFFNESS

The stiffness of the road has been evaluated by falling weight deflectometer measurements.

STATISTICAL EVALUATION

The results have been evaluated with multivariate data analysis (MVDA) using principal component analysis (PCA). For the analysis, the software SIMCA 14.0 developed by Umetrics, Umeå, Sweden was used.

Results and discussion

COMPOSITION OF SOIL MATERIAL

The dry matter varied between 71 and 88% (Table 2) and the loss on ignition, which can be related to the organic content of the soil, varied between 1.5 and 8.9% (Table 2).

The pH value in the soil closest to test section 2 is affected by the ash from the road. The average value 0.5 meters from the road is 7.9. In all other measuring points, the pH value varies between 5.0 and 5.5, which can be considered as normal pH values for Swedish forest land [28]. There is a clear relationship between the calcium concentration and the high pH value at the same measuring point (Figure 4). Calcium oxide present in the ash forms calcium hydroxide in contact with water and thus also increases the pH when the calcium concentration in the soil increases.

There is no significant difference in sulfur content between test section 2 and reference section 2, but the spread is large and the highest measured sulfur content along test section 2 is 72% higher than the highest measured content along reference section 2.

The electrical conductivity varies greatly between the different soil samples. For test section 2, the conductivity is three times higher at 0.5 meters from the road compared to the distance of 2 meters but at the same level as at the distance of 1 meter along reference section 2.

The concentration of trace elements in the soil has been compared with the Swedish Environmental Protection Agency's general guideline values for contaminated soil, sensitive land use [21], (Table 3). The only substance that exceeds the guideline value is barium in all measuring points. The concentration is slightly higher closest to the road, which may indicate that barium has spread from the road. Since there are high concentrations even two meters from the road, the levels can be due to high background levels in the area.

The concentration of zinc is significantly higher at 0.5 meters from test section 2 compared to the distances 1 and 2 meters from the section. It can most likely be linked to the zinc concentration in the ash which was 2130 mg/kg [15]. The gravel used in the reference sections also contains trace elements and for several substances the levels are as high or even higher in the soil along reference section 2 compared to test section 2, for example chromium, lead and copper.

A multivariate data analysis of the chemical properties of the soil shows that samples 0.5 m from test section 2 differ from other samples. In general, there is a greater spread between samples along test section 2 compared with reference section 2, as test section 2 samples are further out from the origin than most samples from reference section 2. (Figure 5a).

COMPOSITION OF SOIL WATER

When the concentrations of hazardous substances in the soil water are compared with guideline values for surface water, class 2, low levels [22] and limit values for drinking water [21], cadmium, zinc and mercury exceed the guideline value for surface water (Figure 6, Table 4). All elements are below the guideline value for drinking water. The concentration of zinc and cadmium is significantly lower in the soil water 0.5 m from test section 2 compared with other test points, even though the total content of zinc and cadmium was the highest at the same distance (Table 4). The lower mobile fraction in soil water may be due to the higher pH in samples closest to the ash road (Figure 4) as the solubility of zinc and cadmium is strongly pH dependent and thus decreases with increasing pH [30].

There is no clear trend between the parallel experiments with the addition of deionized water and acidified water (pH 4) used to achieve 60% of the soil water holding capacity. Some differences can be explained by changes in the pH of the soil water, but other properties can also affect mobility, such as redox and complex formation with organic material.

The results are also difficult to interpret for the main elements as well as chloride and sulphate (Figure 7). Along test section 2, it appears to be a gradient with higher levels of calcium and sulphate closest to the road. For chloride, the situation is reversed. One possible explanation may be that since chloride is very mobile, most leaching of chloride occurred quite initially after the road was upgraded with fly ash. During the 10 years that have passed since the road was upgraded, the chloride front has since then been moved out of the way.

Approximately two years after the road was upgraded, a clear impact was seen on the soil water from the ash road (Figure 8). One meter from the road, the pH is around 7, which is higher than normal forest land [28]. A few years later, an impact can also be seen two meters from the road. At the last sampling, 10 years after the upgrade, the pH value has returned to normal levels, around pH 5. Potassium is very soluble and since the upgrading of the road, potassium has been the substance with the highest concentrations in the soil water. The highest concentrations, both 1 m and 2 m from the road were measured two years after the upgrading. Since then, concentrations have fallen sharply. The dominance of potassium in soil water is also reflected in the electrical conductivity that follows the same pattern. The calcium concentration seems to decline closest to the road and the concentration front has now moved further out from the road. The same trend is seen for chloride.

VEGETATION

Each plant species from each sample point has been analyzed separately with three analyses on each plant species sample. Figure 9 shows the mean and standard deviation of all analyses for each road section and distance (Figure 9). Table 5 provides a summary of normal and toxic concentrations of trace elements for plants [24, 25] and is used as a comparison for measured concentrations in plants.

None of the trace elements are present in such concentrations that it would cause poisoning symptoms in the plants. In the past, chloride has been classified as a micronutrient [24]. However, new research suggests that chloride is a macronutrient for most plants and that concentrations up to 50,000 mg / kg TS can promote plant development [25].

To verify that there is no nutrient deficiency in the plants in the local environment, macro- and micronutrients in the plants are reported in Figure 10. Table 6 shows concentration ranges for nutrients in plants and at what level deficiency symptoms may occur [26]. The concentration of both macro- and micronutrients in the sampled plants is in the range of what is considered sufficient for normal growth.

The multivariate data analysis indicates that there is a difference in chemical composition between plants from test section 2 and the reference section 2 as the data points form two separate clusters. Samples from test section 2, for example, are more associated with high zinc concentrations and several of the main elements such as potassium, calcium and magnesium (Figure 11a, b).

STIFFNESS

In general, the differences in stiffness between the test sections and the reference sections were larger during spring measurements than during autumn measurements. The spring measurements were performed directly after soil frost thawing period and consequently the water content in the road was high. Test section 2 with thicker ash-gravel layer has the highest stiffness during all measurements which indicate that larger amount of ash is favorable. The non-upgraded reference sections (0 and 3) obtained the lowest stiffness in the road. Reference section 3 was situated close to a mire and had thus the lowest stiffness.

To get an overview, the stiffness for all sections were related to one of the gravel-upgraded sections (reference section 1) (Figure 12, Table 7). During spring 2011, test section 1 (with lower amount of ash) had 39 % higher stiffness than reference section 1. But in the following measurements, test section 1 had similar stiffness as reference section 1. Test section 2 (with higher amount of ash) had 75 % higher stiffness than reference section 1 during spring 2011. The measurements in 2019 and 2020 showed still higher stiffness for test section 2 than for reference section 1. These results indicate that a thicker ash-gravel layer is favorable for stiffness development.

Conclusions

The results show that fly ash used as road construction material has a low environmental impact. There was an initial leaching of easy soluble salts, but the leaching has declined with time. No toxic influence in the vegetation has been observed. Test section 2 with the highest amount of ash has a higher stiffness compared to the reference sections. Test section 1, with lower amount of ash, has similar stiffness compared to the reference sections.

Innehåll

1	Inledning	11
1.1	Flygaska som vägstabilisering	11
1.2	Tidigare undersökningar på Sörkrångevägen	11
1.3	Syfte och Mål med föreliggande studie	12
2	Metodbeskrivning	13
2.1	Område	13
2.2	Beskrivning av Ortvikens askproduktion	13
2.3	Beskrivning av prov- och referenssträckor	14
2.4	Belastning och underhåll sörkrångevägen	15
2.5	Jordens sammansättning	15
2.6	Markvattnets sammansättning	15
2.7	Vegetationens sammansättning	16
	2.7.1 Kemiska analysmetoder	17
	2.7.2 Statistisk bearbetning	18
2.8	Vägens hållfasthetsutveckling	18
3	Resultat och diskussion	19
3.1	Jordens sammansättning	19
3.2	Markvattnets sammansättning	23
3.3	Vegetationens sammansättning	28
3.4	Vägens hållfasthetsutveckling	34
4	Slutsatser	38
5	Litteraturreferenser	39

1 Inledning

1.1 FLYGASKA SOM VÄGSTABILISERING

Varje år drabbas en stor del av Sveriges skogsbilvägar av nedsatt framkomlighet och en del sträckor måste stängas av under viss tid, framför allt under tjällossningsperioden, för att vägarna har för låg bärighet. För skogsindustrin och vindkrafts-entreprenörer, som har tunga transporter och som är i behov av farbara vägar året om, kan låg bärighet orsaka ökat vägunderhåll och inkomstbortfall. För att öka bärigheten i vägar kan olika bindemedel, såsom flygaska från biobränslen (bioflygaska), blandas med vägmaterialet [1–7]. Flygaska består till stor del av kalcium- och kiseloxid och har därför puzzolana (cementliknande) egenskaper. Puzzolana egenskaper ger hög tryckhållfasthet och bra tjälning- och frys-tö-egenskaper [8–14] samt bidrar även till låg utlakning av metaller när aska används som vägbyggnadsmaterial [4, 14]. Beroende på bränsle, förbränningsanläggning och lagringsförhållanden har varje flygaska unika egenskaper [5] varav flygaskornas vattenkvot och kalciumoxidinnehåll är viktiga egenskaper för hållfastheten [10].

För att förbättra en vägs bärighet och tjälningsegenskaper kan flygaskan blandas med andra bindemedel såsom cement, merit eller kalciumoxid [4, 8–11]. En inblandning av andra bindemedel fördyrar dock vägkonstruktionen. För att minska kostnaderna är det därför önskvärt att flygaskans puzzolana egenskaper utnyttjas optimalt så att inga övriga bindemedel behövs för att stabilisera vägkroppen. Användning av flygaska som konstruktionsmaterial innebär även en minskad användning av jungfruliga material vilket medför minskad miljöpåverkan jämfört med konventionell uppgradering.

1.2 TIDIGARE UNDERSÖKNINGAR PÅ SÖRKRÅNGEVÄGEN

För att undersöka om bioflygaska, utan tillsats av övriga bindemedel, kan användas för att förbättra bärigheten hos en skogsbilväg uppgraderades år 2009 en skogsbilväg med bioflygaska från ett regionalt pappersbruk. Projektet var ett samarbetsprojekt mellan Skogsstyrelsen, Statens Geotekniska Institut (SGI) och Luleå tekniska universitet (LTU). Den uppgraderade vägen har två provsträckor och fyra referenssträckor. De båda provsträckorna är uppgraderade genom inblandning av olika mängd bioflygaska i befintligt bärlager samt ett nytt grusslitlager. Två av referenssträckorna är uppgraderade med nytt bärlager och grusslitlager medan de andra två referenssträckorna enbart är dikade och hyvlade. Vägens tekniska och miljömässiga egenskaper har undersökts - dels direkt efter uppgraderingen [15–17] och dels sex år efter uppgraderingen [18, 19]. Sammanfattningsvis visar de utförda undersökningarna på att bioflygaska har stor potential för att användas som bindemedel i grusvägar. Asksträckorna hade ett initialt utläckage av framför allt kalium, natrium, klorid och sulfat men efter två år var utlakningen lika mellan ask- och referenssträckor. Den initiala utlakningen bedömdes inte ge några effekter på närmiljön [15]. Asksträckorna hade högre hållfasthet än referenssträckorna framför allt under tjällossningsperioderna och den asksträcka med högst askinblandning uppvisade högst hållfasthet [15–19].

Utvärderingarna visar dock att själva inblandningen av askan i vägkroppen inte hade utförts optimalt eftersom askinblandningen var inhomogen, packningsgraden var otillräcklig och vattenkvoten i ask/moränblandningen var för låg [17]. Trots detta visar asksträckorna goda tekniska och miljömässiga egenskaper.

1.3 SYFTE OCH MÅL MED FÖRELIGGANDE STUDIE

Eftersom en väguppgradering med flygaska kan vara kostsammare än uppgradering med grus är det av intresse att visa hur beständig uppgraderingen är d.v.s. hur de askstabiliserade sträckornas hållfasthet och miljöegenskaper utvecklas med tiden. Det är även intressant att undersöka om den närliggande vegetationen har påverkats av eventuellt utläckage via markvattnet eller från vägdamm från vägkroppen. Sådana här uppföljningar vid askstabiliserade grusvägar är sällsynta. Oftast upphör uppföljande studier efter två-tre år och ibland försvinner även själva studieobjektet av olika anledningar.

Det är därför angeläget att dra nytta av de få väldokumenterade provvägar som finns kvar under en längre tid, t.ex. den i Sörkrånge, och undersöka om vägens goda egenskaper kvarstår eller har förändrats 10 år efter anläggandet.

Projektets mål är att undersöka de tekniska och miljömässiga långtidsegenskaperna hos grusvägen i Sörkrånge 10 år efter uppgraderingen med bioflygaska. De askuppgraderade sträckorna ska jämföras med de konventionellt uppgraderade vägsträckorna.

Delmål är att

- komplettera de tidigare undersökningarna på provvägen (hållfasthet och miljöpåverkan) och därigenom få ökade tidsserier av mätningarna.
- ta jordprover i en gradient från vägen för att undersöka spridning och utläckage av salter och metaller från vägkroppen.
- provta närliggande vegetation för att undersöka eventuell påverkan och upptag av metaller i växterna.

I ett angränsande projekt, med Skogforsk som uppdragsledare [20], har vägens kemiska sammansättning och dess eventuella förändring över tiden undersökts. Dessa två projekt kompletterar varandra och ger en helhetsbild över vägens tekniska och miljömässiga egenskaper 10 år efter uppgraderingen.

2 Metodbeskrivning

I projektet ska utlakningen från vägen och metallinnehållet i den angränsande floran undersökas. För dessa båda undersökningar ska prover tas vid en asksträcka och en referenssträcka. Resultaten ska jämföras mellan sträckorna och utvärderas bland annat med hjälp av multivariat dataanalys (MVDA). I projektet ska också vägens hållfasthet mätas, utvärderas och jämföras med tidigare mätningar.

Följande undersökningar har utförts:

- innehållet av salter och metaller i jord och markvatten från prover uppgrävda i en gradient från vägens kant. (avsnitt 2.4).
- innehållet av salter och metaller i vegetationen som växer 0,5 resp. 2 meter vid vägens kant (avsnitt 2.5).
- fallviktsmätningar för att undersöka vägens hållfasthet. Mätningarna utfördes under hösten 2019 och våren 2020 (avsnitt 2.6).

2.1 OMRÅDE

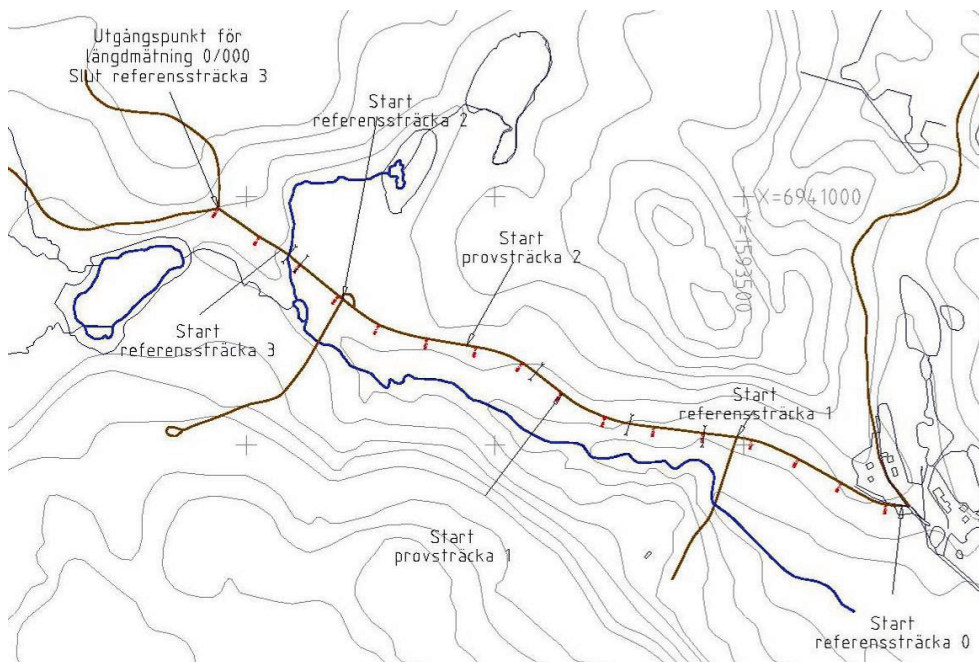
Den uppgraderade grusvägen ligger i Sörkrånge, Timrå kommun, och ägs av SCA Skog AB. Vägen är byggd mellan 1968 och 1970, i huvudsak på tidigare åkermark och fungerar som en primärväg till ett större skogsområde (ca 700 hektar). Vägens överbyggnad består av bärlager med morän i storleksfraktionen 0–50 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.

2.2 BESKRIVNING AV ORTVIKENS ASKPRODUKTION

Bioflygaskan som användes för att stabilisera vägen kommer från SCA, Ortviken i Sundsvall. SCA använder för närvarande askan som fyllnadsmassor inom sina fabriksområden 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. Slammet 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 BESKRIVNING AV PROV- OCH REFERENSSTRÄCKOR

Vägen uppgraderades under juni 2009. Det uppgraderade vägvägningsnittet är ca 1500 meter långt och indelat i två provsträckor och fyra referenssträckor. Provsträcka 1 är 240 meter och provsträcka 2 är 260 meter lång. Referenssträcka 0 är 400 meter, referenssträcka 1 är 320 meter, referenssträcka 2 är 160 meter och referenssträcka 3 är 120 meter lång (Figur 1). Hela vägvägningsnittet dikesrensades och hyvlades.

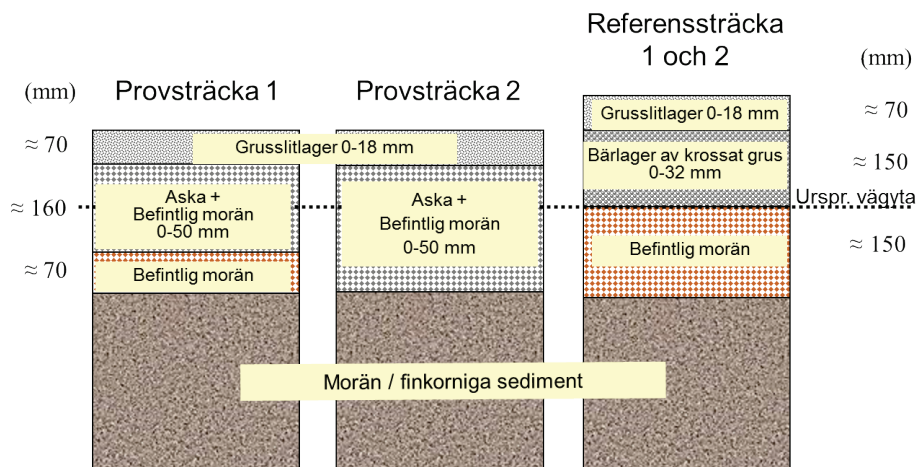


Figur 1. Karta över provområdet med de olika prov- och referenssträckorna markerade.

Figure 1 Map showing the test and reference sections.

Båda provsträckornas askstabiliserade lager består av 30 % aska och 70 % bärlagermaterial men den nedfrästa askmängden skiljer mellan sträckorna. Provsträcka 1 uppgraderades med ca 12 cm opackad flygaska och provsträcka 2 med ca 24 cm opackad flygaska. Askan frästes ner i det befintliga bärlagret av morän. Fräsdjupet i provsträcka 2 var dubbelt så djupt som i provsträcka 1. Efter packning av ask/moränlagret lades slutligen ett 7 cm tjockt grusslitlager (stenstorlek 0–18 mm). Inga ytterligare bindemedel har använts i vägen.

Referenssträckorna 1 och 2 är uppgraderade med 15 cm bärlager (stenstorlek 0–32 mm) och 7 cm grusslitlager (stenstorlek 0–18 mm). Referenssträckorna 0 och 3 är bara dikade och hyvlade. Uppbyggnaden av prov- och referenssträckor framgår av Figur 2.



Figur 2. De båda provsträckornas och två av referenssträckornas uppbyggnad.

Figure 2 Structure of test sections and of reference sections.

2.4 BELASTNING OCH UNDERHÅLL SÖRKRÅNGEVÄGEN

Enligt uppgifter från SCA (mailkonversation Thomas Johansson, Tomas Johansson) har den askuppgaderade vägen inte underhållits under åren 2009–2020 förutom röjning av vegetation (buskar) närmast vägen. Under sommaren 2020 hyvlades vägen men det arbetet utfördes efter provtagningen försommaren 2020. Under åren 2009–2020 har virke tagits ut från markerna längre in i området och virkestransporterna har därmed passerat den askuppgaderade sträckan. Virkestransporter har utförts åren 2011 (1000 m³ + 2000 m³), 2013 (2000 m³), 2015 (250 m³ + 750 m³) samt 2020 (1000 m³).

2.5 JORDENS SAMMANSÄTTNING

Provtagning av jorden utfördes under juni 2020. Provtagningen utfördes på tre avstånd från vägens ytterkant (0,5; 1 och 2 meter) vid tre provpunkter (Figur 3). Totalt nio prover från provsträcka 2 resp. referenssträcka 2 – sammantaget 18 prover. Proverna togs på 30 cm djup. Jorden analyserades m.a.p. torrsubstans (TS), glödningsförlust (GF), fältkapacitet (FC), pH, elektrisk konduktivitet (EC) och grundämnen. Resultaten från de olika vägsträckorna jämfördes mellan varandra och relaterades till riktvärden för förorenad mark [21].

2.6 MARKVATTNETS SAMMANSÄTTNING

Markvatten extraherades ut ur den provtagna jorden med hjälp av Rhizoner – porvattenprovtagare med porstorlek 0,12-0,18 µm. Vatten tillsattes till 500 g torrsubstans jord, till 60 % av jordens fältkapacitet. Materialet blandades om och packades i plastburkar. Rhizoner installerades horisontellt mitt i materialskiktet. Efter 24 h extraherades markvattnet ut med hjälp av vakuum. Parallella försök gjordes med avjonat vatten och med vatten surgjort till pH 4 med HNO₃ för att efterlikna surt regn. Markvattnet analyserades m.a.p. pH, elektrisk konduktivitet (EC), grundämnen samt klorid och sulfat. Resultaten från de olika vägsträckorna

jämfördes mellan varandra och relaterades till tidigare års analyser [15] och till relevanta riktvärden för ytvatten och dricksvatten [22, 23].

Enligt den ursprungliga provtagningsplanen skulle markvatten tas ut från vägkanten via installerade markvattenprovtagare. Provtagning skulle utföras vid den provsträcka som har det mäktigare asklagret (provsträcka 2) samt vid en konventionellt uppgraderad referenssträcka (referenssträcka 2).

Markvattenprovtagarna installerades under hösten 2019 på tre avstånd (0,5; 1 och 2 meter) från vägens ytterkant och på 30 cm djup (tre provpunkter per avstånd och vägsträcka, totalt 18 markvattenprovtagare). Vid provtagningen (hösten 2019) kunde inget vatten erhållas från provtagarna. Därför enades projekt- och referensgruppen om att istället gräva upp jord och extrahera ut markvattnet på lab.

2.7 VEGETATIONENS SAMMANSÄTTNING

Provtagningen av vegetationen utfördes under juni 2020 på två avstånd från vägens ytterkant (0,5 resp. 2 meter) på provsträcka 2 och referenssträcka 2. Vegetationen insamlades från en yta (30*30 cm) från tre provpunkter på respektive avstånd – totalt 12 prover (Figur 3). Vegetationen varierade längs med de olika vägsträckorna. Det var därför inte möjligt att provta samma art från alla provpunkter (Tabell 1). De växtarter som ingår i studien är klöver, (*Trifolium pratense*), hundkäx (*Anthriscus sylvestris*) och midsommarblomster (*Geranium sylvaticum*).

Endast delen ovan jord ingick i provtagningen för att undvika kontamination av växtmaterialet från jorden. Växtdelarna sköljdes i avjonat vatten, torkades, maldes, uppslöts (0,47 ±0,07 g prov + 1 ml H₂O + 2 ml 30 % H₂O₂ + 5 ml HNO₃ (konc.), 195 °C i 10 min.) och analyserades m.a.p. grundämnen samt klorid. Resultaten från de olika vägsträckorna jämfördes sinsemellan och relaterades till relevanta riktvärden för näringsbehov och toxicitet för växter [24, 25, 26].



Figur 3. Markvegetation vid vägen. Vänster bild visar provtagen klöver. Höger bild visar provtagen midsommarblomster. Nedre kant höger bild visar provgropp för jord.

Figure 3 Ground vegetation next to the road. Left picture shows sampled clover. Right picture shows sampled midsummer flowers. Bottom edge right picture shows test pit for soil.

Tabell 1 Provtagna växtarter vid respektive vägsträcka och provpunkt.
Table 1. Sampled plant species at road section and test point.

Avstånd från väg	Provpunkt	Provsträcka 2	Referenssträcka 2
0,5	1	Klöver	Hundkäs, midsommarblomster
	2	Klöver	Hundkäs, midsommarblomster
	3	Klöver	Hundkäs, midsommarblomster
2	1	Hundkäs, midsommarblomster	Midsommarblomster
	2	Hundkäs	Midsommarblomster
	3	Hundkäs	Midsommarblomster

2.7.1 Kemiska analysmetoder

Grundämnen i jord, markvatten och växter har analyserats med ICP-teknik. Klorid och sulfat i markvatten och växter har analyserats kolorimetriskt med segmenterad flödesanalys.

2.7.2 Statistisk bearbetning

Resultaten har utvärderats med multivariat dataanalys (MVDA) genom att använda principalkomponentanalys (PCA). För analysen användes programvaran SIMCA 14.0 utvecklat av Umetrics, Umeå, Sverige.

PCA används för att förklara variationen inom ett datamaterial som består av ett vanligtvis stort antal variabler och dimensioner, genom att transformera det till ett minimalt antal dimensioner, dvs principalkomponenter. Datamaterialet kan sedan projiceras i ett tvådimensionellt plan och presenteras grafiskt i två diagram, score-plot och loading-plot. Score-plotten visar förhållandet mellan proverna och loading-plotten visar förhållandet mellan de analyserade faktorerna. De två plottarna är komplementära och överlagrade. En riktning som ses i en plott motsvarar samma riktning i den andra [27].

2.8 VÄGENS HÅLLFASTHETSUTVECKLING

Fallviktsmätning utfördes i september 2019 och i maj 2020 (efter tjällossningen). Mätningarna utfördes på provvägens samtliga sträckor på samma sätt som vid de tidigare mätningarna [15, 18, 19]. Vid varje tillfälle belastades vägen på var tionde meter och ytmodulen, som anger styvheten för hela vägkonstruktionen från ett visst djup och neråt, beräknades. Resultaten jämfördes mellan sträckorna och med tidigare års mätningar.

3 Resultat och diskussion

3.1 JORDENS SAMMANSÄTTNING

Torrsubstansen i jordproverna varierade mellan 71 och 88 % (Tabell 2) och glödgningsförlusten, som kan relateras till det organiska innehållet i jorden, varierade mellan 1,5 och 8,9 % (Tabell 2). Både fukttinnehållet och jordens fältkapacitet, vilket är maximal vattenmängd vid fri dränering, är starkt kopplat till det organiska innehållet i jorden. Ju högre andel organiska material desto högre fukthalt i jorden och desto högre fältkapacitet.

Tabell 2 Torrsubstans, glödgningsförlust och fältkapacitet i jordprover vid avstånden 0,5; 1 och 2 m från provsträcka 2 och referenssträcka (medel±std, n = 3).

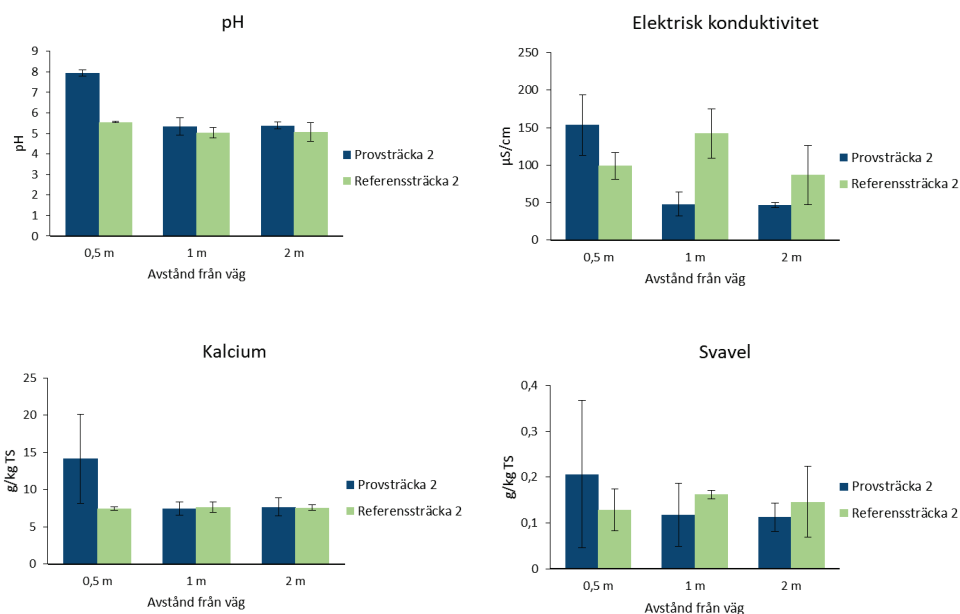
Table 2 Dry weight, loss on ignition and water holding capacity in soil samples 0.5, 1 and 2 m distance from test section 2 and reference section 2 (mean ± std, n = 3).

	Avstånd (m)	Torrsubstans (%)	Glödgningsförlust (% av TS)	Fältkapacitet (%)
Provsträcka 2	0,5	79,6±6,9	4,6±3,9	73,3±31,5
	1	82,1±4,6	4,1±2,0	64,1±16,1
	2	84,0±1,3	2,9±1,4	43,6±9,3
Referenssträcka 2	0,5	81,0±2,7	4,52±1,1	59,0±9,2
	1	81,0±0,6	4,3±1,0	62,4±6,7
	2	77,6±3,9	4,9±2,0	64,5±17,1

pH-värdet i jorden närmast provsträcka 2 är påverkat av askan från vägen. Medelvärdet 0,5 meter från vägen är 7,9. I alla övriga mätpunkter varierar pH-värdet mellan 5,0 och 5,5 vilket kan anses som normala pH-värden för svensk skogsmark [28]. Det finns ett tydligt samband mellan kalciumkoncentrationen och högt pH-värde i samma mätpunkt (Figur 4). Kalciumkoncentrationen är i medeltal dubbelt så hög som i övriga provpunkter. pH styrs av andelen hydroxidjoner som finns löst i jordens porvatten. Kalciumoxid som finns i askan bildar kalciumhydroxid i kontakt med vatten och därmed ökar också pH när kalciumkoncentrationen i jorden ökar.

Det är inte någon signifikant skillnad i svavelhalt mellan provsträcka 2 och referenssträcka 2, men spridningen är stor och den högst uppmätta halten svavel längs med provsträcka 2 är 72 % högre än den högst uppmätta halten längs med referenssträcka 2. Det svavel som lakar ut från askan återfinns företrädesvis i oxiderad form som sulfatsvavel. Vid höga koncentrationer av kalcium och sulfat i lakvattnet kan gips bildas som ett sekundärt material och som kan anrikas i jorden. Höga sulfathalter kan även tillsammans med barium ge utfällningar av bariumsulfat som är ett svårslösligt sekundärt material. I den här undersökningen är det dock inte påvisat vilken typ av mineral de olika grundämnena och föreningar ingår i.

Den elektriska konduktiviteten varierar stort mellan de olika jordproverna. För provsträcka 2 är konduktiviteten tre gånger så hög 0,5 meter från vägen jämfört med avståndet 2 meter. Det är dock i samma nivå som vid avståndet 1 meter längs med referenssträcka 2.



Figur 4. pH, elektrisk konduktivitet, koncentration av kalcium och svavel i jordprover vid avstånden 0,5; 1 och 2 m från provsträcka 2 respektive referenssträcka 2 (medel \pm std, n = 3).

Figure 4 pH, electrical conductivity, concentration of calcium and sulfur in soil samples at distances 0.5; 1 and 2 m from test section 2 and reference section 2 respectively (mean \pm SD, n = 3).

Koncentrationen av spårämnen i jorden har jämförts med Naturvårdsverkets generella riktvärden för förorenad mark, känslig markanvändning (KM) [21], (Tabell 3). Det enda ämne som överskrider riktvärdet är barium i samtliga mätpunkter. Koncentrationen är något högre närmast vägen, vilket kan tyda på att barium spridits från vägen. Bariumkoncentrationen i askan och gruset som användes vid uppgraderingen var 2 630 respektive 477 mg/kg TS [15]. Men eftersom det är höga koncentrationer även två meter från vägen kan halterna bero på höga bakgrundshalter i området. Bariumhalten varierar stort mellan olika jordar. Analyser gjorda av Sveriges lantbruksuniversitet, SLU visar på bariumhalter mellan 32 och 1609 mg/kg i svenska mineraljordar på 0,5 m djup och med ett medelvärde på 608 mg/kg [29].

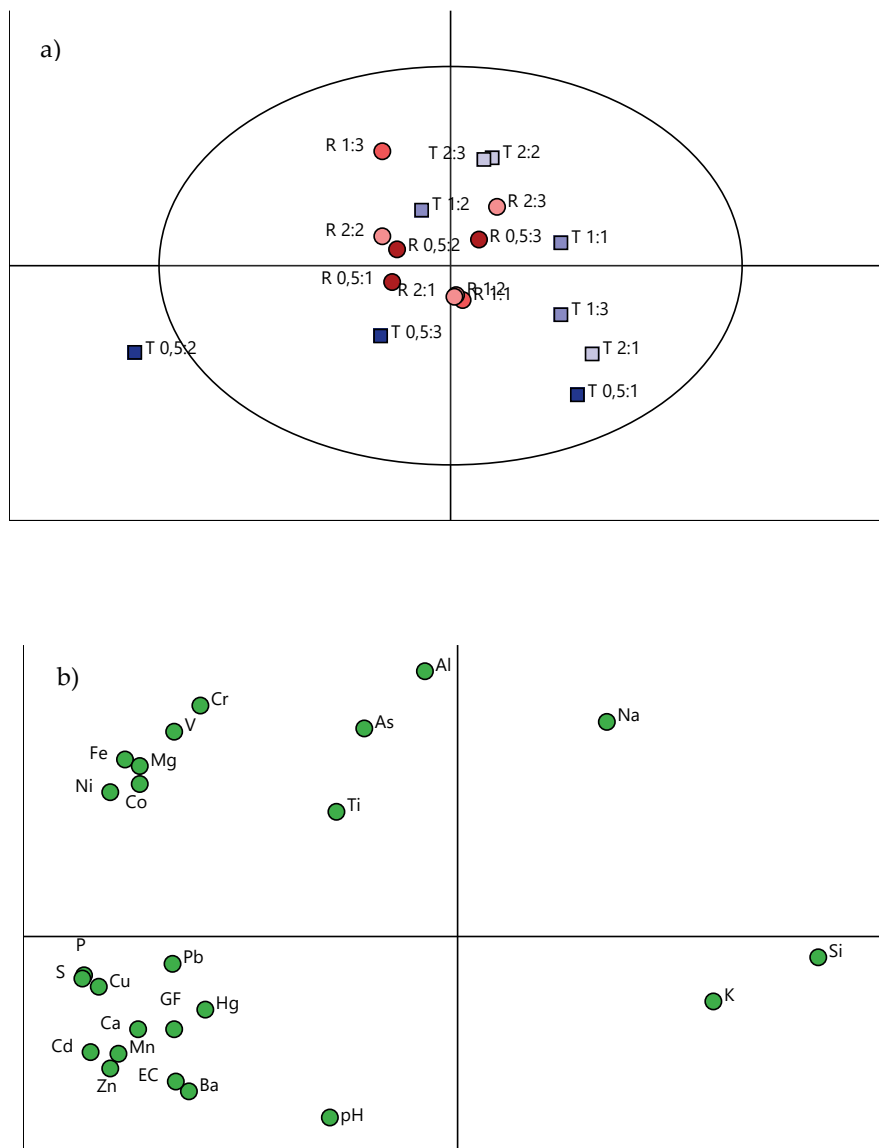
Koncentrationen av zink är signifikant högre 0,5 meter från provsträcka 2 jämfört med 1 och 2 meter ifrån. Det kan mest troligt kopplas till zinkkoncentrationen i askan som var 2130 mg/kg [15]. Även gruset som användes vid uppgraderingen innehåller spårämnen och för flera ämnen är det lika höga eller till och med högre halter i marken längs med referenssträcka 2 som längs med provsträcka 2, till exempel krom, bly och koppar. Det är också troligt att trafiken längs med vägen bidragit till spridning av vissa spårämnen.

Tabell 3 Koncentration av spårämnen i jordprover i mg/kg vid avstånden 0,5; 1 och 2 m från provsträcka 2 respektive referenssträcka 2 (medel±std, n = 3) och generella riktvärden för förorenad mark, känslig markanvändning (KM) [21].

Table 3 Concentration of trace elements soil samples in mg/kg at distances 0.5; 1 and 2 m from test section and reference section respectively (mean ± std, n = 3) and guideline values for contaminated soil, sensitive land use (KM) [21].

Spår- ämne	Provsträcka 2			Referenssträcka 2			Generella rikt- värden, KM		
	Avstånd (m)	0,5	1	2	0,5	1		2	
Arsenik	0,5	0,91±0,90	0,78±0,56	2,90±1,93	0,5	1,15±0,24	1,47±0,37	1,26±0,36	10
Barium	0,5	573±35	482±14	497±6	0,5	523±13	493±11	484±5,6	200
Bly	0,5	6,28±4,47	5,29±2,17	4,22±0,28	0,5	9,23±3,97	8,09±1,61	8,04±3,43	50
Kadmium	0,5	0,13±0,09	0,03±0,02	0,04±0,01	0,5	0,09±0,03	0,09±0,02	0,07±0,03	0,8
Kobolt	0,5	1,36±0,75	1,19±0,69	1,07±0,63	0,5	1,73±0,30	1,72±0,48	1,42±0,21	15
Koppar	0,5	7,03±4,85	2,72±1,91	2,99±1,49	0,5	5,37±1,62	4,62±0,03	4,88±2,66	80
Krom	0,5	22,8±8,8	23,2±5,1	24,4±6,0	0,5	25,5±2,4	27,1±8,3	26,3±4,8	80
Kvicksilver	0,5	0,05±0,01	0,04	0,04	0,5	0,05±0,01	0,04	0,05±0,01	0,25
Nickel	0,5	4,26±2,46	3,44±1,69	3,39±1,90	0,5	4,89±0,84	4,64±1,43	3,90±1,11	40
Vanadin	0,5	21,6±6,49	21,9±4,7	20,3±5,7	0,5	25,1±1,2	23,2±4,9	23,7±2,8	100
Zink	0,5	67,1±44,6	9,31±4,76	8,01±3,76	0,5	24,4±8,8	24,1±3,3	17,2±7,6	250

En multivariat dataanalys över de kemiska egenskaperna i jorden visar att prover 0,5 m från provsträcka 2 skiljer ut sig från övriga prover. Generellt sett är det större spridning mellan prover längs med provsträcka 2 jämfört med referenssträcka 2 då provsträcka 2 prov ligger längre ut från origo än vad de flesta prov från referenssträcka 2 gör (Figur 5a). Några faktorer som prov 0,5 m från provsträcka 2 är associerade med är högre pH, elektrisk konduktivitet, kalcium-, barium- och zinkkoncentrationer (Figur 5b).

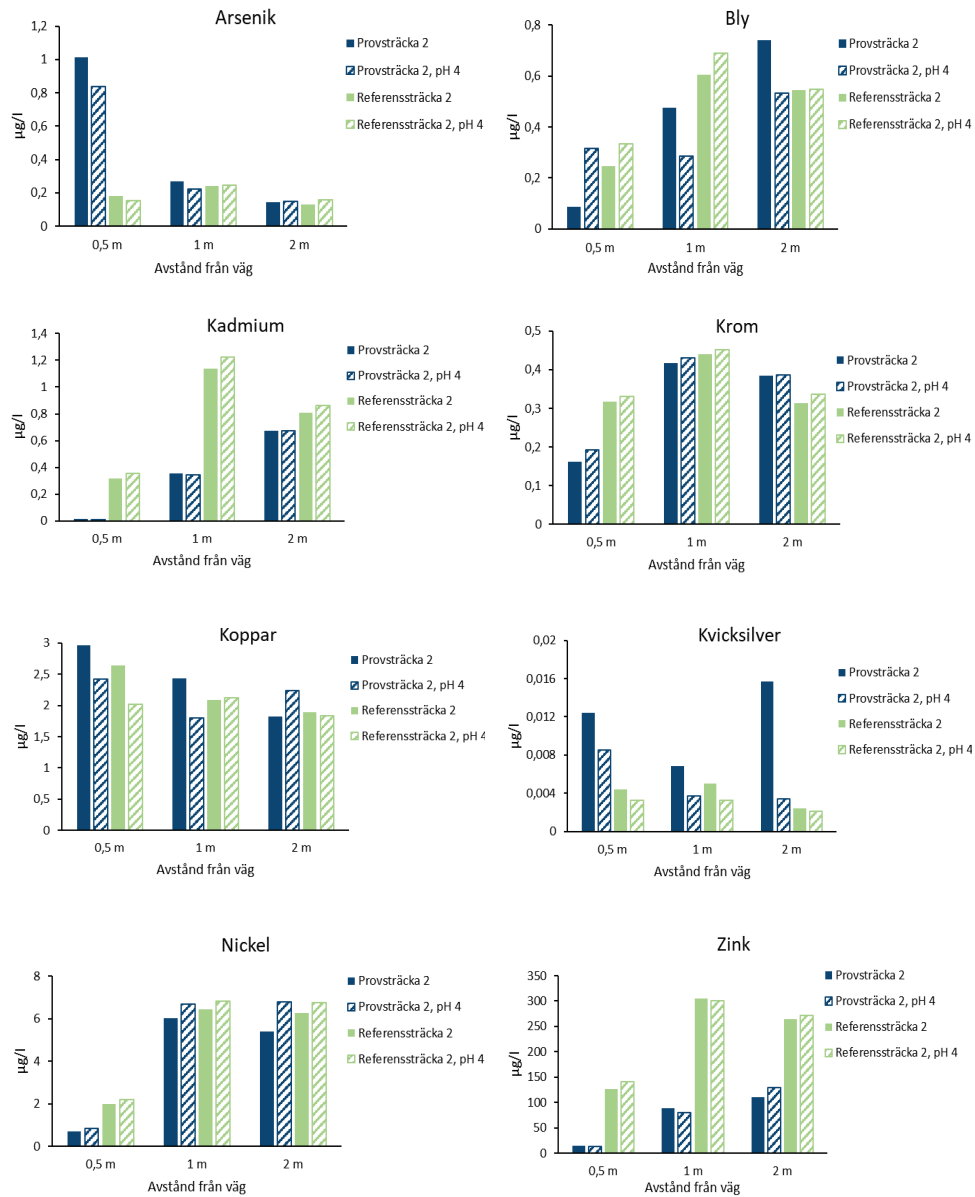


Figur 5. (a) PCA score plot för alla jordprover vid avstånden 0,5; 1 och 2 m från provsträcka 2 respektive referenssträcka 2. T=provsträcka 2, R=referenssträcka 2. (b) PCA loading plot över kemiska egenskaper i jordproverna i Figur 5a.

Figure 5 (a) PCA score plot of all soil samples at distances 0.5; 1 and 2 m from test section 2 and reference section 2 respectively. (b) PCA loading plot of chemical properties in all soil samples in Figure 5a.

3.2 MARKVATTNETS SAMMANSÄTTNING

När koncentrationerna av riskämnena i markvattnet jämförs med riktvärdena för ytvatten, klass 2, låga nivåer [22] och gränsvärdena för dricksvatten [21] så överskrider kadmium, zink och kvicksilver riktvärdet för ytvatten (Figur 6, Tabell 4). Alla element ligger under riktvärdet för dricksvatten. Koncentrationen av zink och kadmium är betydligt lägre i markvattnet 0,5 m från testvägen jämfört med övriga provpunkter trots att totalhalten av zink och kadmium var de högsta vid samma avstånd (Tabell 4). Den lägre mobila fraktionen i markvattnet kan bero på det högre pH-värdet i prover närmast askvägen (Figur 4) då lösligheten för zink och kadmium är starkt pH-beroende och sjunker med stigande pH [30]. Halten kvicksilver i askan var 147 µg/kg medan koncentrationen i gruset som användes för uppgradering av referenssträcka 2 var mindre än 0,02 µg/kg [15]. Den högre halten kvicksilver i askan avspeglar sig i en något högre mobil fraktion av kvicksilver i markvattnet. Totalanalyserna av jorden visar dock inte på några skillnader i halten kvicksilver mellan provsträcka 2 och referenssträcka 2 (Tabell 3).



Figur 6. Koncentration av spårämnen i markvatten (neutralt och pH 4) vid avstånden 0,5; 1 och 2 m från provsträcka 2 respektive referenssträcka 2. (medel, n = 3)

Figure 6 Concentration of trace elements in soil water (neutral and pH 4) at distances 0.5; 1 and 2 m from test section 2 and reference section 2, respectively. (mean, n = 3)

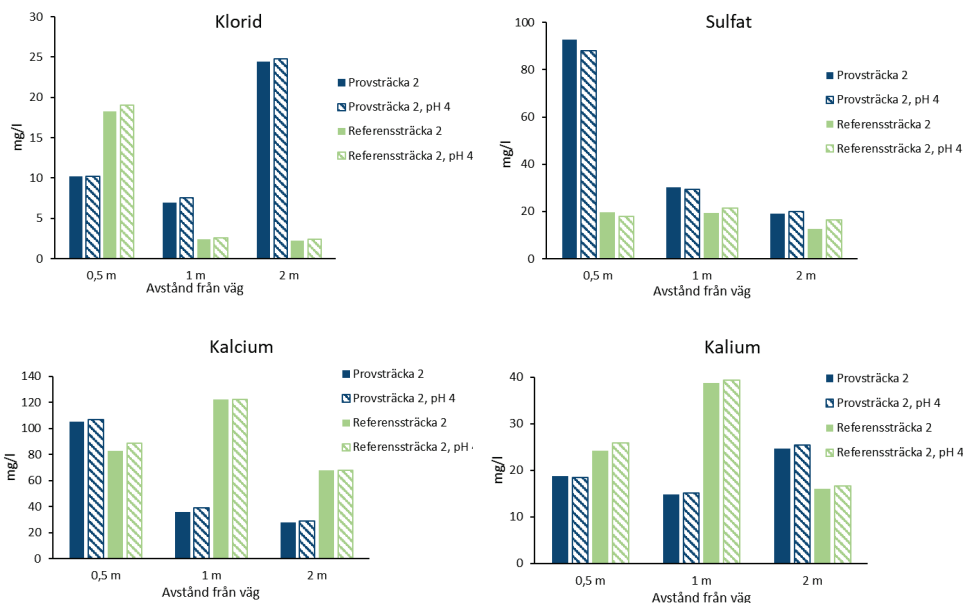
Tabell 4 Riktvärden för koncentration i µg/l av spårämnen i ytvatten, klass 2 låg nivå (SNV, 2007) [22] och gränsvärden för dricksvatten (SLV, 2001) [23].

Table 4 Guideline values for concentration in µg/l of trace elements in surface water, class 2 low level (SNV, 2007) [22] and limit values for drinking water (SLV, 2001) [23].

Spårämne	Riktvärden ytvatten Klass 2, låga nivåer [22]	Gränsvärden, otjänligt dricksvatten [23]
Antimon	-	5
Arsenik	0,4-5	10
Bly	0,2-1	10
Kadmium	0,01-0,1	5
Krom	0,3-5	50
Koppar	0,5-3	2000
Kvicksilver	0,002	1
Nickel	0,7-15	20
Selen	-	10
Zink	5-20	-

Det finns inte någon tydlig trend mellan de parallella försöken med tillsats av avjonat vatten respektive surgjort vatten (pH 4) som använts för att uppnå 60 % av jordens fältkapacitet. För vissa element ökar mobiliteten i flertalet provpunkter vid pH 4 till exempel krom, nickel och bly medan det för andra element minskar, t.ex. för koppar. Skillnaderna kan till viss del förklaras med förändringar av pH i markvattnet, men även andra egenskaper kan påverka mobiliteten så som redox och komplexbildning med organiskt material.

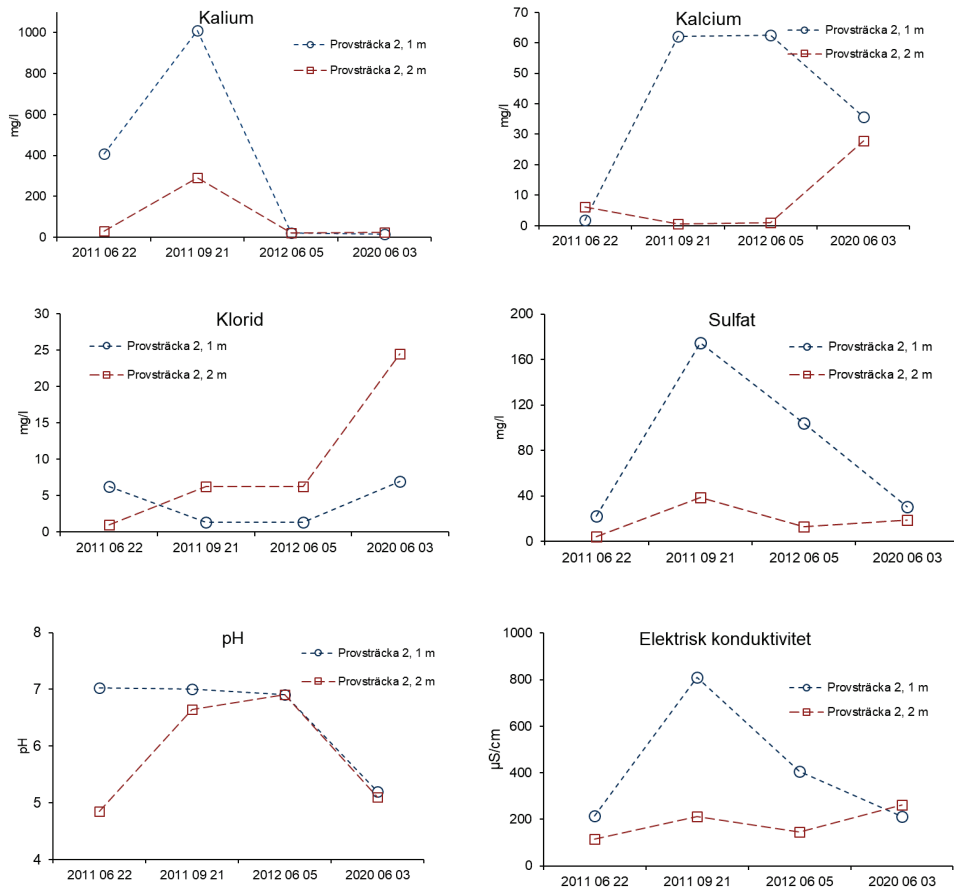
Även för huvudelementen samt klorid och sulfat är resultaten svårtolkade (Figur 7). Längs med provsträcka 2 ser det ut att vara en gradient med högre halter av kalcium och sulfat närmast vägen. För klorid ser situationen omvänd ut. En möjlig förklaring kan vara den att eftersom klorid är mycket mobil har den mesta utlakningen av klorid inträffade ganska initialt efter att vägen uppgraderats med flygaska. Under de 10 år som förflutit sedan vägen uppgraderades har sedan kloridfronten förflyttats ut från vägen.



Figur 7 Koncentration av klorid, sulfat, kalcium och kalium i markvattnet (neutralt och pH 4) vid avstånden 0,5; 1 och 2 meter från provsträcka 2 respektive referenssträcka 2 (medel, n=3).

Figure 7 Concentration of chloride, sulphate, calcium and potassium in soil water (neutral and pH 4) at distances 0.5; 1 and 2 m from test section 2 and reference section 2 respectively (mean, n = 3).

Markvattnets kemiska egenskaper längs med vägen har analyserats ett flertal tillfällen sedan projektets start. Då det varit svårt med provtagningen finns det bara sammanhängande provserier från provsträcka 2 vid avstånden 1 och 2 meter från vägen. Senaste provtagningen av markvatten är utförd på labb på uppgrävda prover. Alla tidigare provtagningar är gjorda i fält. Det kan därför råda en diskrepans mellan analysresultaten som beror på provtagningsmetoden. Flertalet spårelement har legat under detektionsgränsen vilket gör att det inte finns några trender att redovisa för dessa element.



Figur 8 Trender i markvattnets koncentration av kalium, kalcium, klorid och sulfat samt pH och EC vid avståndet 1 och 2 m från Provsträcka 2. Tidsaxel är ej skalenlig.

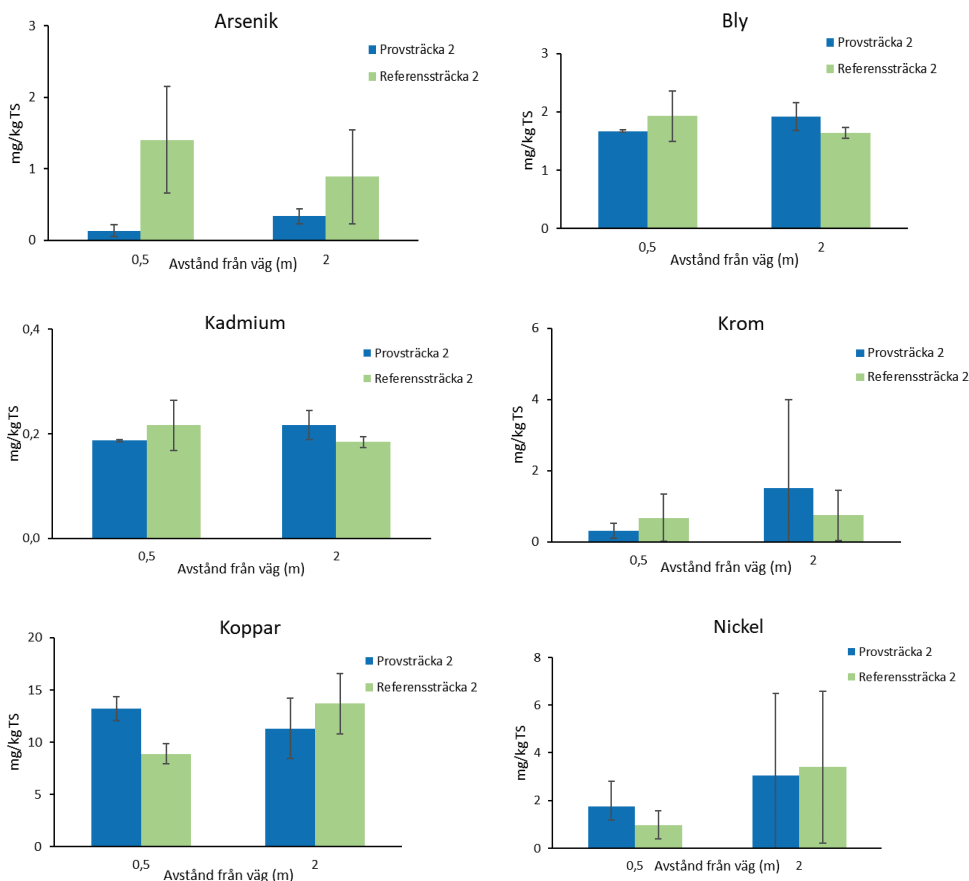
Figure 8 Trends in the soil water concentration of potassium, calcium, chloride and sulphate as well as pH and EC at the distance of 1 and 2 m from test section 2. Time axis is not to scale.

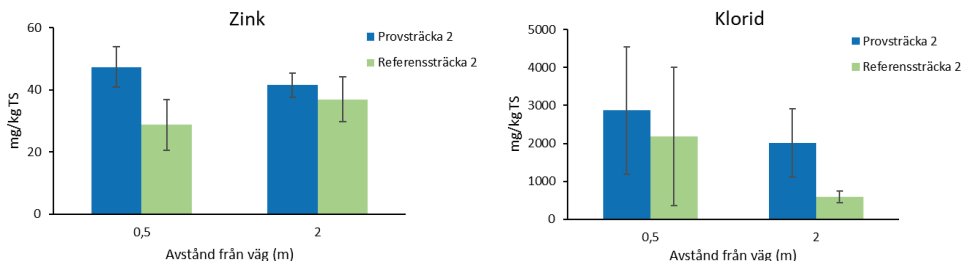
Ungefär två år efter att vägen uppgraderats syntes en tydlig påverkan på markvattnet från askvägen (Figur 8). En meter från vägen är pH runt 7 vilket är högre än normalt för skogsmark [28]. Något år senare syns en påverkan även två meter ut från vägen. Vid senaste provtagningen, 10 år efter uppgraderingen, har pH värdet återgått till normala nivåer, runt pH 5. Kalium har varit det ämne med de högsta koncentrationerna i markvattnet sedan projektets start. De högsta koncentrationerna, både 1 m och 2 m ut från vägen uppmättes två år efter uppgraderingen av vägen. Sedan dess har koncentrationerna sjunkit kraftigt. Det kalium som finns i flygaskan är mycket lösligt. Totalhalter kalium i den flygaska som använts vid uppgraderingen var 29,7 g/kg och vid lakteter i labb [31] mobiliserades 21 % av totalhalten [15]. Dominansen av kalium i markvattnet avspeglar sig även på den elektriska konduktiviteten som följer samma mönster. Kalciumkoncentrationen verkar sjunka närmast vägen och där har nu koncentrationsfronten rört sig längre ut från vägen. Detsamma gäller för klorid.

3.3 VEGETATIONENS SAMMANSÄTTNING

Val av ämnen som redovisas grundar sig i de spårämnen som finns upptagna i Naturvårdsverkets rapport Återvinning av avfall i anläggningsarbeten [32] eftersom det primärt är flygaskans påverkan på växterna som ska bedömas. Markmiljön kan påverkas av askan både genom direkt avsättning av damm från vägen, varefter det sker en utlakning till jorden, och genom utlakning direkt från vägkroppen. De ämnen som ingår i Naturvårdsverkets rapport är arsenik, bly, kadmium, koppar, krom, kvicksilver, nickel, zink, klorid och sulfat. Av dessa ämnen har sulfat och kvicksilver inte analyserats i växtmaterialet.

Varje växtart från respektive provpunkt har analyserats var för sig med tre analyser på varje växtartsprov. I figur 9 redovisas medelvärde och standardavvikelse av alla analyser för respektive vägsträcka och avstånd (Figur 9).





Figur 9 Koncentration av spårämnen i växter 0,5 och 2 m från provsträcka 2 respektive referenssträcka 2 (medel \pm std, n = 3).

Figure 9 Concentration of trace elements in plants 0.5 and 2 m from test section 2 and reference section 2, respectively (mean \pm std, n = 3).

I tabell 5 finns en sammanställning över normala och toxiska koncentrationer av spårämnen för växter [24, 25] och som använts som jämförelse mot uppmätta koncentrationer i växterna.

Tabell 5 Normal koncentration i mg/kg TS av spårämnen i växter och koncentration i växter med förgiftningssymptom [24, 25]

Table 5 Normal concentration in mg/kg DW of trace elements in plants and concentration in plants with symptoms of poisoning [24, 25]

Spårämne	Normal koncentration	Koncentration i växter med förgiftningssymptom
Arsenik	0,003-0,01 ^a	5-20 ^a
Bly	0,32-6,4 ^a	30-300 ^a
Kadmium	0,022-0,1 ^a	10-20 ^a
Krom	0,014-0,2 ^a	10 ^a
Koppar	3,5-6,7 ^a	20-100 ^a
Nickel	0,24-0,5 ^a	10-100 ^a
Zink	22-37 ^a	100-400 ^a
Klorid	10-5 500 ^a , 2 000-20 000 ^b	2700 ^a , 15 000-35 000 ^b

^aKabata-Pendias och Pendias, 1992 [24]

^bColmenero-Flores et al., 2019 [25]

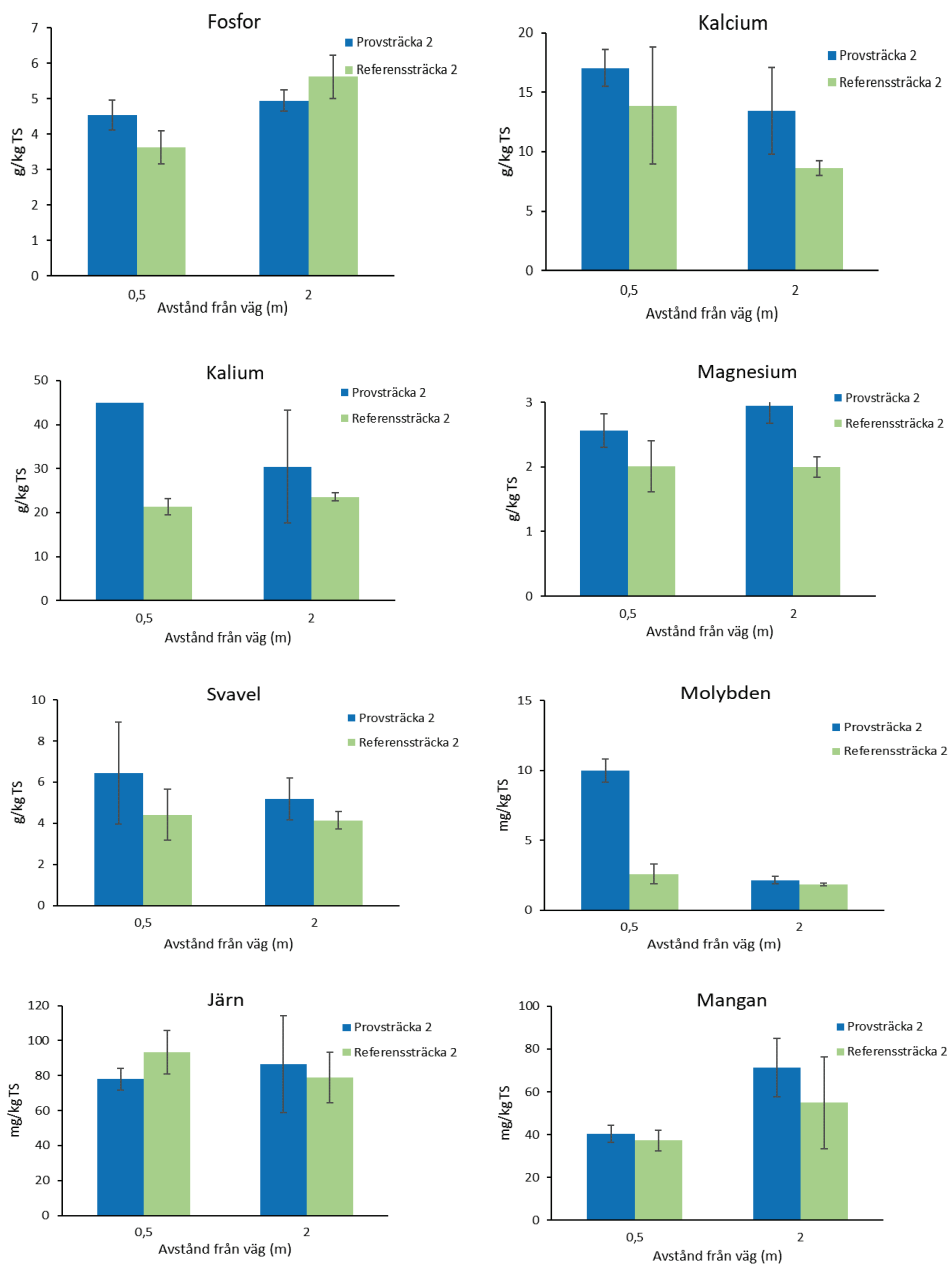
Inget av spårämnena finns i sådana koncentrationer att det skulle ge förgiftningssymptom hos växterna. Däremot överskrider flera element normala koncentrationer [24]. Koncentrationerna för bly och kadmium låg under detektionsgränsen för analysen och där har detektionsgränsen redovisats (Figur 9). Att det finns en viss variation i koncentrationerna även för dessa element beror på skillnad i invägningen av material.

Tidigare har klorid klassats som ett mikronäringsämne [24]. Men ny forskning sammanställd tyder på att klorid är ett makronäringsämne för flertalet växter och att koncentrationer upp till 50 000 mg/kg TS kan främja växters utveckling [25].

Förändrade kemiska egenskaper i närmiljön till vägen, som ett förändrat pH-värde, kan påverka växternas näringsupptag. För att kontrollera att det inte föreligger näringsbrist hos växterna i vägen närmiljö redovisas makro- och mikronäringsämnen i växterna i Figur 10. De makronäringsämnen som är

nödvändiga för växter är kväve, fosfor, kalium, svavel, kalcium och magnesium. Vissa spårelement är också nödvändiga för växter såsom bor, klor, molybden, koppar, järn, mangan, nickel och zink. I den här studien har kväve och bor inte analyserats. I höga koncentrationer kan även livsnödvändiga spårelement såsom koppar och zink ge en toxisk effekt i växter.

I tabell 6 finns koncentrationsintervall för näringsämnen i växter och vid vilken nivå bristsymptom kan uppträda [26]. Koncentrationen av både makro- och mikronäringsämnen i de provtagna växterna ligger i intervallet för vad som anses tillräcklig för en normal tillväxt. Inget ämnes koncentration ligger under gränsen för när bristsymptom kan uppstå.

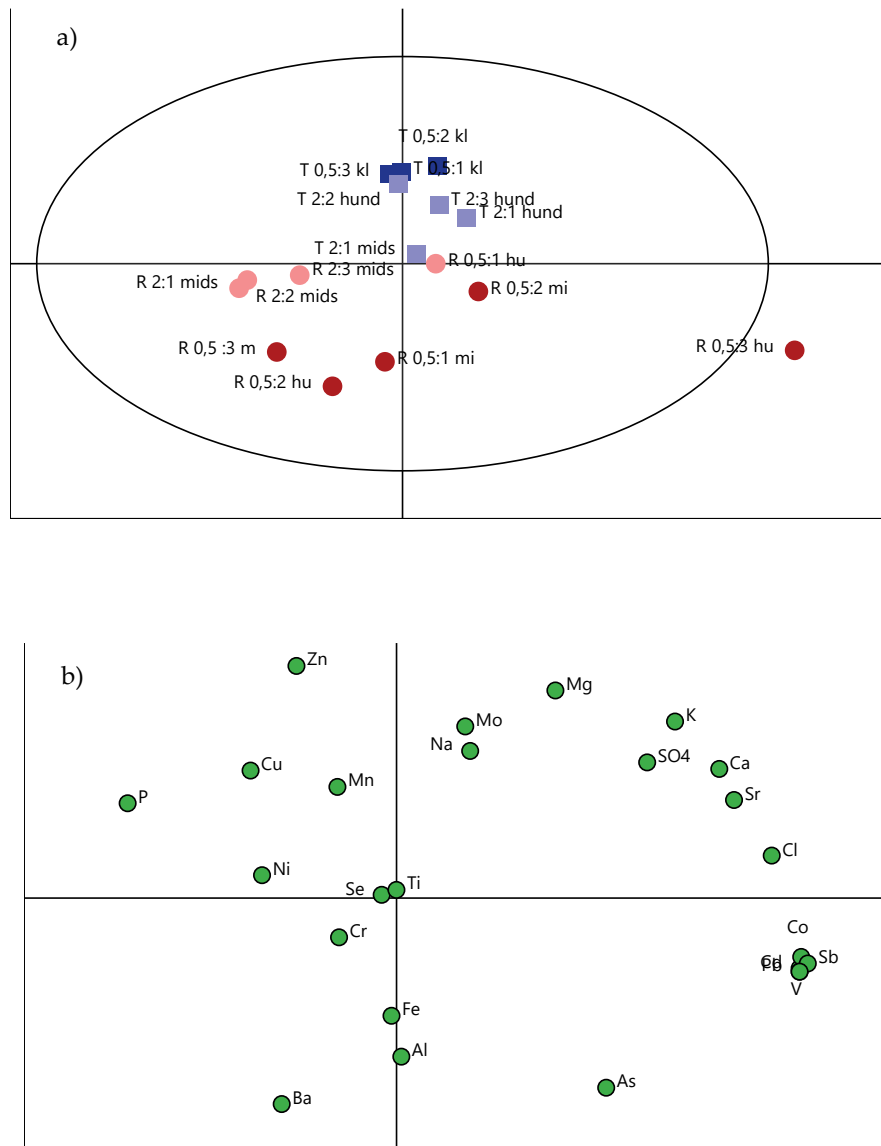


Figur 10 Koncentration av näringsämnen i växter 0,5 och 2 m från provsträcka 2 respektive referenssträcka 2 (medel \pm std, n = 3).

Figure 10 Concentration of nutrients in plants 0.5 and 2 m from test section 2 and reference section 2, respectively (mean \pm std, n = 3).

Tabell 6 **Koncentrationsintervall av näringsämnen i växter och gräns när bristsympton kan uppträda [26].**
 Table 6 **Concentration interval of nutrients in plants and limit when deficiency symptoms may occur [26].**

Ämne	Enhet	Koncentrationsintervall	Gräns för bristsymtom
Fosfor	g/kg	1-5	2
Kalcium		1-50	8
Kalium		10-60	20
Magnesium		1-5	2
Svavel		1-15	5
Järn	mg/kg	70-200	40
Koppar		5-15	2
Mangan		30-300	10
Zink		30-200	10



Figur 11 (a) PCA score plot för alla växtprover vid avståndet 0,5 och 2 meter från provsträcka 2 respektive referenssträcka 2. T=provsträcka 2, R=referenssträcka 2. (b) PCA loading plot över kemiska egenskaper i växtproverna i Figur 11 a.

Figure 11 (a) PCA score plot for all plant samples at the distance 0.5 and 2 meters from test section 2 and reference section 2, respectively. (b) PCA loading plot of chemical properties in the plant samples in Figure 11 a.

Den multivariata dataanalysen tyder på att det finns en skillnad i kemisk sammansättning mellan växter från provsträcka 2 och referenssträckan 2 då datapunkterna bildar två separata kluster. Prover från provsträcka 2 är till exempel mer associerade till höga zinkkoncentrationer och flera av huvudelementen så som kalium, kalcium och magnesium (Figur 11a, b). Referenssträckans växter innehåller högre koncentrationer arsenik. Det är även en större skillnad mellan provsträcka 2

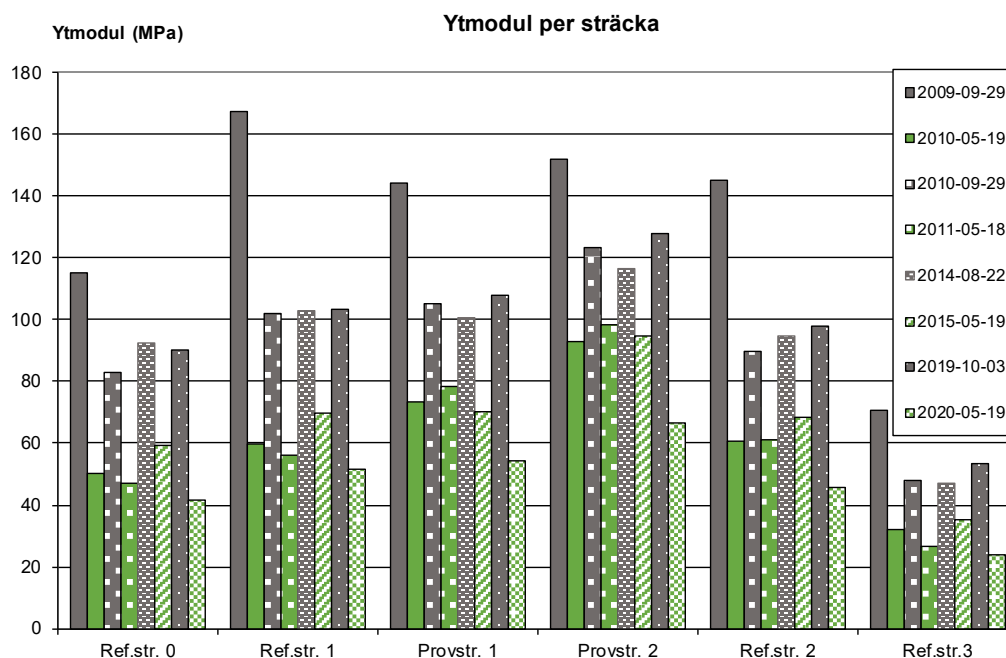
och referenssträcka 2 för prov från 0,5 m från vägen än för prov från 2 meter, då prov från 0,5 m från vägen ligger i över och underkant av score-plotten medan prov från 2 meters avstånd ligger mer centrerat i mitten av score-plotten (Figur 11a).

3.4 VÄGENS HÅLLFASTHETSUTVECKLING

I likhet med tidigare utförda fallviktsmätningar resulterade de senaste utförda mätningarna (hösten 2019 och våren 2020) i stora deflektioner vilket betyder att ytan är mjuk och bärigheten är låg. Ytmodulens medelvärde varierade mellan 24 och 128 MPa beroende på sträcka och mättillfälle (Figur 12, Tabell 7).

Lägst bärighet har referenssträckorna 0 och 3 som enbart utsattes för dikning och hyvling. Referenssträcka 3, som uppvisar den lägsta bärigheten, ligger i en svacka intill en myr. Sannolikt förekommer även skillnader i undergrunden längs provvägen. Provsträcka 2 med större inblandningsdjup och dubbel mängd aska jämfört med provsträcka 1 har högst styvhet vid alla mätningar (Figur 12, Tabell 7).

Lägre värden har uppmätts vid vårmätningarna jämfört med höstmätningarna (Figur 12, Tabell 7). Varmätningarna har utförts vid tjällossningen då vägen har högt vatteninnehåll. Våren 2020 hade en sen snösmältning och tjällossning vilket resulterade i en fuktigare väg vid mättillfället jämfört med tidigare år och därmed en lägre ytmodul. Det är därmed inte säkerställt att vägens bärighet har blivit sämre jämfört med tidigare utan den lägre ytmodulen kan bero på de fuktigare förhållandena vid mättillfället.



Figur 12 Översikt av bärligheten uttryckt som styvhet (ytmodul) för de sex sträckorna vid samtliga åtta mättillfällen. Ytmodulerna är utvärderade från fallviktsmätningar. Medelvärde av 41, 33, 21, 27, 16 och 11 belastningspunkter beroende på sträcka.

Figure 12 Stiffness presented as average surface modulus. Values are obtained from falling weight deflectometer measurements for both reference and test sections.

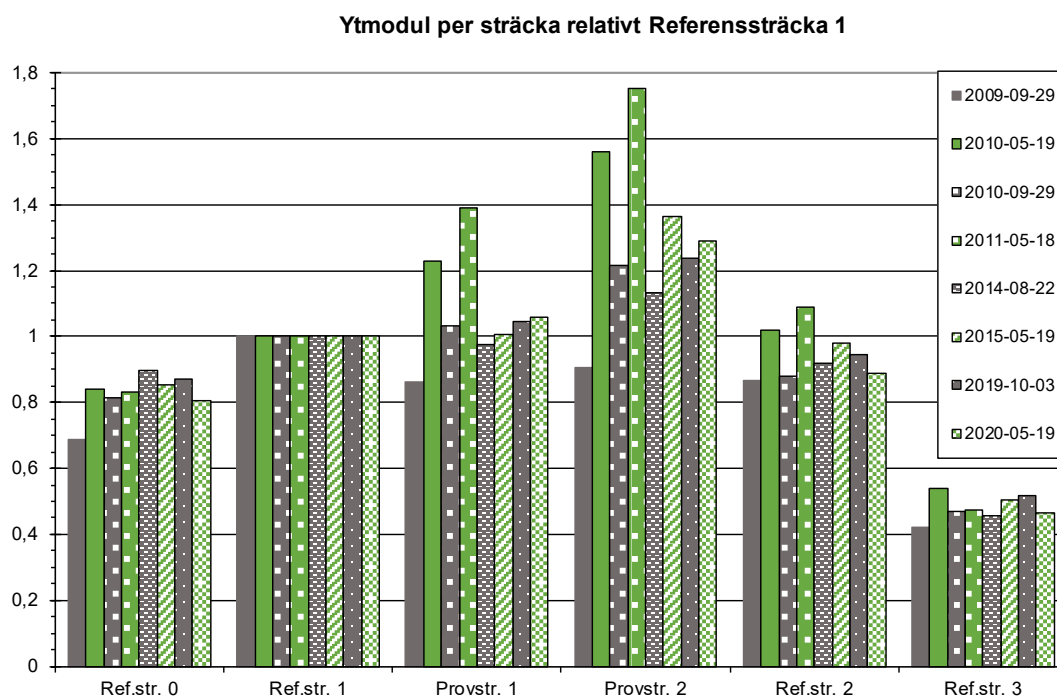
Tabell 7 Bärlighet för de sex sträckorna, uttryckt som styvhet (ytmodul) utvärderad från fallviktsmätning.

Table 7 Stiffness for the sections as average surface modulus.

Sträcka	Ytmodul (Mpa)	
	2020.10.03	2020.05.19
Referenssträcka 0	90	42
Referenssträcka 1	104	52
Provsträcka 1	108	55
Provsträcka 2	128	66
Referenssträcka 2	98	46
Referenssträcka 3	53	24

När bärligheten för alla sträckor relateras till referenssträcka 1 (Figur 13, Tabell 8) har provsträcka 2, med högst askinblandning, den största positiva differensen. Vid vårmätningen 2011 visade provsträcka 1, med lägre askinblandning, 39 % större bärlighet än referenssträcka 1 men vid de efterföljande mätningarna har provsträcka 1 visat likartad bärlighet som referensen. Provsträcka 2, med högre askinblandning, hade 75 % högre bärlighet än referenssträcka 1 vid vårmätningen 2011. Provsträcka 2 uppvisar vid de senaste mätningarna 24 % och 29 % högre

bärighet än referenssträcka 1. Denna procentuella skillnad liknar skillnaden som uppmättes fem år tidigare. Detta tyder på att bärigheten hos asksträckan med det mäktigare asklagret inte har försämrats i jämförelse med referenssträcka 1 under de elva år som gått sedan vägen uppgraderades.



Figur 13 Bärigheten för alla sträckor i relation till Referenssträcka 1.

Figure 13 Stiffness for all sections in relation to Reference section 1.

Tabell 8 Bärighetsutveckling för de båda provsträckorna i relation till referenssträcka 1.

Table 8 Comparison in stiffness between the test sections and reference section 1.

Mätdatum	Kvot mellan ytmoduler	
	Prov 1/Ref 1 (%)	Prov 2/Ref 1 (%)
2009.09.29	86	91
2010.05.19	123	156
2010.09.29	103	121
2011.05.18	139	175
2014.08.22	98	113
2015.05.19	101	136
2019.10.03	104	124
2020.05.19	106	129

För att kunna jämföra mätningarna har samma utrustning använts vid mättillfällena och utvärderingen har gjorts med samma lagermodell och samma lagertjocklekar. Alla mätningar har utförts enligt Trafikverkets metodbeskrivning [33, 34] där exempelvis hänsyn tas till temperaturen vid mättillfället. Mätningarna har utförts under höst och vår vid respektive år. Skillnader kan dock förekomma mellan åren avseende temperatur och vattentillgång i undergrunden. Dessutom förekommer sannolikt skillnader i undergrundens uppbyggnad längs provvägen. Eftersom de olika sträckorna ligger i vägens längdriktning skiljer sig också omgivande miljö och vatteninnehåll en del mellan sträckorna. Trots eventuella skillnader i undergrund och omgivning uppvisar provsträcka 2 (med störst askinblandning) högst bärighet.

4 Slutsatser

Flygaska från Ortvikens pappersbruk som använts som vägbyggnadsmaterial i detta projekt har en ringa miljöpåverkan. Det som påvisats är utlakning av lösliga salter framför allt under de två första åren efter uppgradering.

Låga initiala halter av spårämnen i flygaskan och en låg spridning av dessa till markvattnet gör att ingen toxisk påverkan på växtligheten har kunnat identifierats.

Tio och elva år efter vägens uppgradering har provsträcka 2, med tjockare askinblandning, en påtagligt högre bärighet jämför med referenssträckorna. Provsträcka 1, med mindre askinblandning, har liknande bärighet som referenssträckorna.

Genom att blanda befintligt bärlager av morän med bioflygaska, utan några andra bindemedel, har en påtaglig förbättring av vägens hållfasthet uppnåtts.

5 Litteraturreferenser

- [1] Mácsik J. Flygaska som förstärkningslager i väg. Värmeforsk Rapport 949, Stockholm, 2006
- [2] Mácsik J., Svedberg B. Skogsbilvägsrenovering av Ehnsjövägen, Hallstavik. Värmeforsk Rapport 968, Stockholm, 2006
- [3] Mácsik J., Erlandsson Å., Wexell B-A. Flygaska–Grönlutslamstabiliserad skogsbilväg – Fallstudie Iggesund. Värmeforsk Rapport 1101, Stockholm, 2009
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Oburger E, Jäger A, Pasch A, Dellantonio A, Stampfer K, Wenzel WW. Environmental impact assessment of wood ash utilization in forest road construction and maintenance – A field study, *Science of The Total Environment*, 544:711-721, 2016
- [7] Kaakkurivaara T, Kolisoja P, Uusitalo J, Vuorimies N. Fly Ash in Forest Road Rehabilitation, *Croatian Journal of Forest Engineering*, 37(1): 119-130, 2016
- [8] Lahtinen P., Jyrävä H., Maijala A., Mácsik J. Flygaskor som bindemedel för stabilisering av grusmaterial. Värmeforsk Rapport 918, Stockholm, 2005
- [9] Lahtinen P., Maijala, A., Mácsik, J. Produkter baserade på blandningar av flygaska och fiberslam (fiberaskor) för vägbyggande. Värmeforsk Rapport 915, Stockholm, 2005
- [10] Mácsik J., Svedberg B., Lenströmer S., Nilsson T. FACE Flygaska i geotekniska anläggningar, Etapp 1: Inventering/Tillämplighet. Värmeforsk Rapport 870, Stockholm, 2004
- [11] 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
- [12] Zhou H., Smith D.W., Sege 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
- [13] Mulder E. A mixture of fly ashes as road base construction material. *Waste Management*, 16 (1-3): 15-20, 1996

- [14] Taylor HFW. Cement Chemistry, Second edition, Thomas Telford Publishing, London, Storbritannien, 1997
- [15] Nordmark D., Vestin J., Lagerkvist A., Lind B.B., Arm M., Hallgren P. Geochemical Behavior of a Gravel Road Upgraded with Wood Fly Ash. *Journal of Environmental Engineering*, 140 (10), 2014
- [16] Arm M., Vestin J., Lind B.B., Lagerkvist A., Nordmark D., Hallgren P. Pulp mill fly ash for stabilization of low-volume unpaved forest roads – field performance. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(11): 955-963, 2014
- [17] Vestin J., Arm M., Nordmark D., Hallgren P., Tiberg C., Lagerkvist A., Lind B. Effektivt askutnyttjande i vägar. *Värmeforsk Rapport 1169*, Stockholm, 2011
- [18] Vestin J., Nordmark D., Arm M., Lind B., Lagerkvist A. Långtidsuppföljning av grusväg stabiliserad med bioflygaska – Sörkrångevägen. *Energiforsk Rapport 2016:264*, Stockholm, 2016
- [19] Vestin J., Nordmark D., Arm M., Lind B., Lagerkvist A. Biofuel ash in road stabilization – lessons learned from six years of field testing. *Transportation Geotechnics*, 14:146-156, 2018
- [20] Hansson L., Nordmark D., Vestin J., Bergqvist M., Skogsbilvägar med inblandning av aska. Miljökonsekvenser på kort och lång sikt. Rapport 2020:687, Energiforsk AB, Stockholm
- [21] Riktvärden för förorenad mark: modellbeskrivning och vägledning. Stockholm: Naturvårdsverket, 2009. Tillgänglig på Internet: <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-5976-7.pdf>
- [22] Bedömningsgrunder för sjöar och vattendrag: bilaga A till handbok 2007:4. 1. utg. Stockholm: Naturvårdsverket, 2007
- [23] Statens livsmedelsverks föreskrifter om dricksvatten. SLVFS 2001:30. Statens livsmedelsverks författningssamling, 2001
- [24] Kabata-Pendias, Alina & Pendias, Henryk. Trace elements in soils and plants. 3. ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2001
- [25] Colmenero-Flores, Jose M.; Franco-Navarro, Juan D.; Cubero-Font, Paloma; et al. Chloride as a Beneficial Macronutrient in Higher Plants: New Roles and Regulation. *International Journal of Molecular Science*, 20(19), 2019
- [26] Båth, B. Makronäringsämnen, Ekologisk grönsaksodling på friland. Jordbruksverket, Jönköping,
- [27] Eriksson, L. Multi- and megavariate data analysis: basic principles and applications. 3., rev. ed. Malmö: MKS Umetrics, 2013

[28] Nilsson, T., Stendahl, J. och Löfgren, O. Markförhållanden i svensk skogsmark – data från Markinventeringen 1993-2002. Rapport 19. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, 2015

[29] [https://www.slu.se/miljoanalys/statistik-och-miljodata/miljodata/webbtjanster-miljoanalys/markinfo/markinfo/markkemi/totalhalter-i-mineraljorden/sparamnen/\(2020-12-01\)](https://www.slu.se/miljoanalys/statistik-och-miljodata/miljodata/webbtjanster-miljoanalys/markinfo/markinfo/markkemi/totalhalter-i-mineraljorden/sparamnen/(2020-12-01))

[30] Van der Sloot, H., Kosson, D. och Hjelmar, O. Characteristics, treatment and utilization of residues from municipal waste incineration. Waste Management, 21, 753-765, 2001

[31] EN 12457-2, Characterisation of waste – Leaching – Compliant test for leaching of granular waste materials and sludges - Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction). European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, 2002.

[32] Naturvårdsverket. Återvinning av avfall i anläggningsarbeten. Handbok 2010:1, Naturvårdsverket, Stockholm, 2010

[33] Trafikverket. TRVMB 112 – Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat. Publikation 2012:050 Trafikverket, Borlänge, 2012

[34] Trafikverket. TRVMB 114 – Bearbetning av deflektionsdata, erhållna vid provbelastning av väg med FWD-apparat Publikation 2012:051, Trafikverket Borlänge, 2012

Sökord

Grusväg, flygaska, hållfasthet, vegetation, markvatten, lakning, metaller.

LÅNGTIDSSTUDIE AV ASKSTABILISERAD GRUSVÄG

År 2009 uppgraderades en grusväg utanför Timrå med flygaska från ett närbeläget pappersbruk för att undersöka om bioflygaska kan användas för att förbättra bärigheten. Vägens initiala tekniska och miljömässiga egenskaper är väl dokumenterade i tidigare undersökningar.

Resultaten av en långtidsuppföljning visar att den använda flygaskan lämpar sig väl för uppgradering av grusvägar. Den initiala utlakningen av lösliga salter klingar av efter två år. Ingen toxisk påverkan kan konstateras i den närliggande vegetationen. Hållfastheten ökar med ökad askhalt och den sträcka som har högst askinblandning visar en påtagligt högre hållfasthet än referenssträckorna.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se