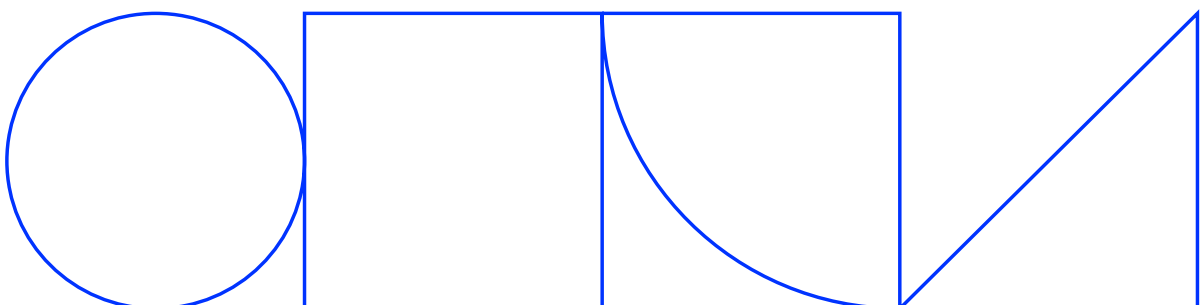
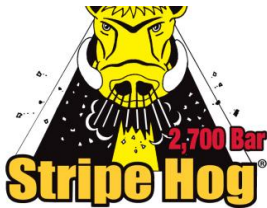


Återvinning av termoplastisk vägmarkering

Martin Gunnarsson, Julia Danell, Hanna Fager, Ida Järlskog och Niklas Aneklev
Svevia AB, VTI och Stripe Hog Scandinavia AB

2025-12-03

SVEVIA
vti



Kort sammanfattning

Termoplastiska vägmarkeringar är viktiga för trafiksäkerheten men produktionen av dem orsakar stor miljöpåverkan, särskilt genom komponenter vars produktion av mycket energiintensiv som pigment, bindemedel och glaspärlor. Denna studie undersöker möjligheten att återvinna vägmarkeringsmaterial genom två borttagningstekniker: högtrycksvattenblästring och mekanisk fräsning.

Vattenblästring resulterade i finkornigt material förorenat med bitumen och vägdamm. Mekanisk fräsning gav grövre materialfraktioner som var lättare att återanvända, men processen medförde också betydande skador på asfaltsbeläggningen samt föroreningar i det återvunna materialet eftersom fräsprocessen inte var optimerad utifrån ett återvinningsperspektiv. Trots detta visar resultaten sammantaget att insamling av termoplastisk vägmarkering för återvinning är tekniskt möjlig, att mekanisk fräsning ger högre materialkvalitet trots föroreningsproblem och att vattenblästring är en metod som är skonsammare för beläggningen, men som kräver ytterligare efterbehandling för att fungera effektivt i praktiken.

De återvunna materialen analyserades i laboratorium med avseende på kornstorlek, bindemedelshals, titandioxidhalt och premixhalt. Eventuella skador på glaspärlorna som uppkommit under återvinningsprocessen undersöktes också. Därefter blandades de återvunna materialen in i nya termoplastiska formuleringar med olika halt: 10-, 20- och 30-vikt %. Formuleringarna testades i verklig trafikmiljö vid NordicCerts provfält genom applicering i september 2024. Inledande resultat visade på lägre ljushet vid högre halt återvunnet innehåll. Dock uppfyllde formuleringarna med 10 % respektive 20 % återvunnet material som framställts med mekanisk fräsning samtliga funktionskrav, inklusive retroreflektion ($RL \geq 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$), luminanskoefficient ($Q_d \geq 130 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$), friktion ($\geq 50 \text{ SRT}$) och kulörparametrar.

Studien visar att återvinning av termoplastiska vägmarkeringar kan minska miljöpåverkan och samtidigt bidra till cirkulär ekonomi inom vägbyggnad. Mekanisk fräsning framstår som den mest lovande tekniken för att producera återvinningsbart material av hög kvalitet, även om kontaminering fortfarande är en utmaning. Vattenblästring ger mindre beläggningsskador men ger lägre grad av materialåtervinning. Resultaten utgör ett viktigt steg mot mer hållbara vägmarkeringsmetoder.

Nyckelord

Termoplastiska vägmarkeringar, återvinning, mekanisk fräsning, vattenblästring, cirkulär ekonomi, trafiksäkerhet.

Innehållsförteckning

Kort sammanfattning.....	5
Förord.....	7
1. Introduktion.....	8
1.1. Bakgrund.....	8
1.2. Olika typer av vägmarkeringar och vägmarkeringsmaterial	8
1.3. Miljö- och klimatpåverkan hos termoplastiska vägmarkeringsmaterial	9
1.4. Kunskapsläget kring återvinning av vägmarkering.....	10
1.5. Syfte	10
2. Metod.....	11
2.1. Insamling av vägmarkeringsmaterial för återvinning	11
2.1.1. Mekanisk fräsning.....	11
2.1.2. Vattenblåstring.....	12
2.2. Återvinningsprocesser.....	13
2.3. Laboratorieanalyser.....	15
2.4. Fältförsök	16
2.4.1. Beskrivning av provfältet.....	16
2.4.2. Applicering av material på provfältet	17
3. Resultat och diskussion.....	18
3.1. Materialinsamling och återvinningsprocess.....	18
3.2. Laboratorieanalys av återvunna råmaterial	20
3.3. Laboratorieanalys av formuleringar med återvunnet råmaterial	21
3.4. Initialmätningar på provfältet.....	23
3.5. Miljöpåverkan av återvinning av termoplastiska vägmarkeringar	24
4. Slutsatser	25
Referenser	26

Förord

Denna rapport är en sammanfattning på svenska av en studie som har undersökt möjligheten att återvinna termoplastiska vägmarkeringar och integrera återvunnet material i nya vägmarkeringar. Studien har genomförts med fokus på teknisk genomförbarhet och initial funktion, inklusive laboratorieanalyser och försök på väg under verkliga trafikförhållanden.

Projektet har finansierats av forskningsprogrammet InfraSweden, tillsammans med medfinansiering av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond och från de deltagande företagsparterna Svevia AB och Stripe Hog Scandinavia AB. Projektet har bidragit med ny kunskap om cirkulär materialanvändning inom transportsektorn. Målet har varit att undersöka metoder för insamling, separation och återanvändning av termoplastiska vägmarkeringar, samt att analysera effekterna på materialets funktionella egenskaper. Studien har även lagt grunden för framtida arbeten inom hållbar vägmarkeringsteknik och resurssnål infrastruktur.

Vi vill rikta ett stort tack till alla som deltagit i projektet, framför allt till den personal som samlat in material och till dem som deltog vid utläggningen på provfältet. Deras insatser har varit avgörande för att möjliggöra denna sammanställning och de slutsatser som presenteras i rapporten.

Linköping, oktober 2025

Hanna Fager
Projektledare

1. Introduktion

1.1. Bakgrund

Vägmarkeringar är en del av väginfrastrukturen där de spelar en viktig roll genom att reglera, varna och vägleda trafikanter [1, 2]. Kraven på vägmarkeringar är höga eftersom de måste fungera under många olika förhållanden och omfattar krav på synbarhet i både dagsljus och mörker samt när vägbanan är våt. Det ställs även krav på kulör och friktion så att vägmarkeringarna står i kontrast mot vägbeläggningen och inte är hala så att de orsakar halkolyckor.

Det finns olika typer av vägmarkering, där de huvudsakliga särdragen ligger i användningssyftet och i materialsammansättningen. Generellt sett består vägmarkering av en blandning av bindemedel, pigment, fyllnadsmedel och tillsatser. Beroende på sammansättningen kan vägmarkeringar delas in i flera grupper. I Sverige, liksom i de övriga nordiska länderna, är så kallade termoplastiska vägmarkeringar den produkttyp som används mest. En marknadsundersökning från *Skandinaviska vägmarkeringsföreningen* baserad på statistik från 2021 visade att över 90% av de utlagda volymerna av vägmarkering i Sverige var termoplastisk massa [3]. Situationen är liknande i både Norge och Danmark.

Termoplastisk vägmarkering är lösningsmedelsfri och smälts innan den appliceras på vägen där den bildar en sammanhållen film genom kylning. Massan består fyllnadsmedel, inblandningsglas, pigment och tillsatser som hålls ihop av ett bindemedel. Fyllnadsmedlet, som kan bestå av till exempel sand eller dolomit, har till syfte att ge materialet struktur samt bidrar till friktion. För vita vägmarkeringar består pigmentet av titandioxid (TiO_2) som ger kulören och förstärker de retroreflektiva¹ egenskaperna. Inblandningsglaset består av ca 100–1000 μm stora glaspärlor som säkerställer retroreflektionen på längre sikt samt bidrar till friktionsegenskaperna. Utöver inblandningsglaset används även glaspärlor tillsammans med friktionsmedel som strös över ytan vid utläggning för att säkerställa initial retroreflektion och friktion.

I de nordiska länderna består bindemedlet normalt sett av ca 10–15 % kolofoniumbaserade hartser eller kolvätehartser eller en blandning av dessa [4]. Utöver hartserna tillsätts 5–10% oljor, polymerer (till exempel etylenvinylacetat-sampolymer eller styren-block-sampolymer) och vax för att ge formstabilitet och flexibilitet hos materialen även vid låga temperaturer, samt säkerställa slitstyrka mot dubbdäck.

Vägmarkeringar utsätts för stort slitage och kräver ofta årligt underhåll, särskilt i regioner med återkommande vinterväghållning eller användning av dubbdäck. När fordon kör över vägmarkeringar slits de gradvis ner och genererar mikroplaster och fina partiklar [5-9], vilka kan spridas i miljön, orsaka luftföroreningar och påverka marina och terrestra ekosystem när de sköljs ut i vattendrag [10].

1.2. Olika typer av vägmarkeringar och vägmarkeringsmaterial

Det finns olika typer av vägmarkeringsmaterial som används globalt och materialval i olika regioner påverkas av faktorer såsom klimat, trafikvolym, regelverk och även tradition. De fyra huvudsakliga materialkategorierna är färg (vatten- eller lösningsmedelsbaserad), termoplastiska material, kallplastmaterial (ibland kallade reaktiva material eller flerkomponentsystem) samt vägmarkeringstejp [11, 12]. I Sverige, liksom i övriga Norden har termoplastiska material varit det självklara valet sedan användningen av lösningsmedelsbaserad färg förbjöds i slutet 1980-talet. Att termoplastiska material används beror på att de är de enda material som klarar av det krävande klimatet med stora

¹ Retroreflektion (R_L) är ett mått på en ytas förmåga att reflektera tillbaka ljuset, i detta fall från ett fordonstrålkastare tillbaka till föraren. Det brukar benämnas som ett mått på vägmarkeringens synbarhet i mörker och mäts i enheten $\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$.

temperaturskillnader mellan sommar och vinter, frekvent vinterväghållning och användning av dubbdäck. Internationellt är vattenbaserad färg är det vanligaste materialet [13].

Vägmarkeringars livslängd avgörs av hur länge de kan uppfylla de nödvändiga funktionerna på vägen. De slits mekaniskt till följd av fordon kör över dem och där det största slitaget sker under dubbdäckssäsongen. Snöröjning i form av plogning och sopning sliter också mekaniskt på markeringarna, men även temperaturväxlingar, fukt och UV-strålning bryter ner dem. Det mekaniska slitaget beror mycket på vägmarkeringens position på vägen där längsgående linjer som till exempel kantlinjer slits betydligt mindre än tvärgående linjer som exempelvis stopplinjer och övergångsställen. Vissa typer av vägmarkeringar måste åtgärdas årligen, medan andra kan bibehålla funktionen i 5–10 år [14]. När vägmarkeringen måste förbättras appliceras vanligtvis ett nytt lager ovanpå det gamla.

I Sverige är den maximalt tillåtna tjockleken på vägmarkeringar 4 mm, därefter krävs borttagning av den gamla vägmarkeringen innan ny massa läggs ut. Att applicera ny vägmarkeringsmassa ovanpå den gamla kan fungera bra om ytan är ren och inte alltför åldrad. Trafikverket har dock uppmärksammat att vidhäftningen stundvis varit så pass dålig att vägmarkeringen släppt under den första vintersäsongen. Därför ställer man sedan några år tillbaka krav på tvättning före applicering av ny massa, men man ställer också allt oftare krav på att gammal vägmarkering ska fräsas bort från ytan innan ny massa appliceras för att säkerställa tillräcklig vidhäftning. Den borttagna massan läggs på deponi.

1.3. Miljö- och klimatpåverkan hos termoplastiska vägmarkeringsmaterial

Termoplastiska vägmarkeringar har en betydande klimat- och miljöpåverkan, främst på grund av att vissa av råmaterialen (pigment, glaspärlor och bindemedel) orsakar stora utsläpp vid framställning. Att förlänga livslängden på vägmarkeringar är avgörande för att minska deras totalt klimat- och miljöpåverkan [15]. Livscykelanalysstudier har visat att vägmarkeringarnas livslängd är avgörande för dess totala klimatpåverkan [16, 17] och där har termoplastiskt massa och kallplast lägst beräknad klimatpåverkan på grund av den långa livslängden jämfört med både vattenburen och lösningsmedelsburen färg.

Cirka 40 % av termoplastiska vägmarkeringar består av inblandningsglas som gör att materialet bibehåller sina retroreflekterande egenskaper när ytglaset slitits bort under de första månaderna på vägen. Både inblandningsglas och ytglas tillverkas huvudsakligen av återvunnet fönsterglas (silikatglas), men produktionen är mycket energiintensiv eftersom glasugnarna drivs med gas och måste nå temperaturer på 1500–1700 °C. Detta leder till stora utsläpp av växthusgaser och hög energiförbrukning.

Titandioxid är det främsta pigmentet i vägmarkeringsmaterial, vars produktion innebär både miljömässiga och geopolitiska utmaningar [18]. Processen är mycket energiintensiv och genererar betydande växthusgasutsläpp som bidrar till klimatförändringar [19, 20]. Titanbrytning orsakar dessutom allvarliga miljöskador, inklusive förlust av biologisk mångfald, avskogning och markförstöring. De kemiska processerna som krävs för att framställa pigmentet producerar även stora mängder avfall och föroreningar som påverkar luft- och vattenkvalitet. Utöver detta finns geopolitiska risker, eftersom en stor del av den globala titanproduktionen sker i politiskt instabila regioner. Detta medför problem kopplade till leveranskedjans säkerhet, människorättskränkningar och konfliktfinansiering. Uppskattningar visar att cirka 10 % av världens titanproduktion kommer från högriskländer med dåliga arbetsvillkor och exploatering av arbetare [21, 22].

1.4. Kunskapsläget kring återvinning av vägmarkering

Återvinning av vägmarkering har inte tidigare varit ett fokus inom forskningen då materialet ansetts vara opproblemiskt ur miljöhänsyn och dessutom slits ned vid användning. Men ökat fokus på resursanvändning och ny kunskap om att vägmarkeringar orsakar utsläpp av mikroplastpartiklar till miljön har gjort att intresset för ett mer hållbart vägmarkeringsunderhåll ökat. Att återvinna hela materialet har tidigare inte gjorts.

Gällande glaspärlorna i materialet använder man i huvudsak återvunnet planglas vid framställningen. Endast för ett fåtal specialtillämpningar används glas tillverkat från nya råvaror. I en bredare kontext finns flera studier där man försökt återvinna pigment (titandioxid) i färg. I en doktorsavhandling från Chalmers skriven av Karlsson [23] undersöktes möjligheterna att återvinna och att använda återvunnen TiO_2 som ersättning, helt eller delvis, för ny TiO_2 i vattenburen färg. I denna och liknande studier har tanken varit att separera ut de mest värdefulla materialen och låta resterna hanteras genom energiåtervinning eller eventuellt som fyllnadsmedel [24-27]. I Karlssons studie separerades och renades TiO_2 i en trestegsprocess som inkluderade två steg av pyrolys. Resultaten av studien visade att det återvunna pigmentet fungerade relativt bra i färgformulering men att det fanns problem med ytdefekter som orsakade dålig dispersion av pigmenten. Processen för att framställa högkvalitativ TiO_2 från återvunnen färg var omständlig och energikrävande.

För vägmarkering finns idag ingen systematisk återvinning, varken på komponentnivå eller som helhet, men i och med att en allt större andel vägmarkeringsmassa tas bort från vägen i samband med underhållsåtgärder så väcks frågan om inte denna massa också kan återanvändas? I många europeiska länder, bland annat Tyskland, är det redan idag krav på att all gammal vägmarkering tas bort före underhållsåtgärder [28].

1.5. Syfte

Även om framsteg har gjorts genom utveckling av termoplaster med förnybara eller naturligt modifierade hartser [13, 29] räcker inte dessa innovationer sig. Det är minst lika viktigt att hantera resursförbrukningen genom att främja materialåteranvändning som en central lösning för hållbarhet.

Detta pilotprojekt har haft till syfte att bedöma genomförbarhet för återvinning av termoplastiska vägmarkeringar genom test av borttagningsmetoder samt undersökning av materialegenskaper hos de återvunna komponenterna och efterföljande prestation i verklig trafik.

Delar av denna rapport har tidigare publicerats i Fager, Järleskog [30].

2. Metod

2.1. Insamling av vägmarkeringsmaterial för återvinning

Det finns flera metoder för borttagning av vägmarkering, dock är i huvudsak två metoder lämpliga för termoplast: vattenblästring och mekanisk fräsning. Vid vattenblästring används vattenstrålar som under högt tryck lossar markeringen från ytan. Vattnet samlas upp i en tank och filtreras. Vattnet kan återanvändas och den filtrerade massan kasseras vilket i de flesta kommuner innebär att den läggs på deponi. Vid mekanisk fräsning används fina diamanttänder för att lossa materialet från beläggningen. Det frästa materialet samlas in och kasseras. Både metoderna har utvärderats i projektet.

2.1.1. Mekanisk fräsning

Mekanisk fräsning utfördes av Svevia i Stockholms län på en 15 cm bred långsgående intermittent körfältsmarkering som hade applicerats ca 12 månader tidigare och som skulle tas bort i samband med ett vägarbete. Materialet samlades in av Svevia under juni 2024 och kördes därefter till Svevias laboratorium i Jönköping. Därifrån hämtades fräsmassorna för vidare hantering hos VTI.

Vägmarkeringen bestod av ett vitt termoplastiskt extruderat material, certifierat av NordicCert i hjulpassageklass P5. Samma material användes både som referens och som bas i de återvunna formuleringarna. Tjockleken var cirka 3 mm. Fräsningen utfördes med en maskinfräs av modellen Wirtgen W 50 Ri, se Figur 1, utrustad med en 50 cm frästrumma och diamantbestyckade tänder med 3 mm mellanrum, speciellt konfigurerad för precisionsfräsning.

Frästrumman som användes hade en bredd som var betydligt större än markeringens bredd, vilket gjorde att en stor del överskottsmaterial följde med vid fräsning. I dagsläget finns inga speciella frästrummor som är anpassade i bredd efter vägmarkeringar, vilket gör att onödigt mycket av asfaltsbeläggningen följer med.

Mekanisk fräsning kan utföras med olika typer av maskiner, både stora lastbilsmonterade fräsmaskiner och mindre manuella maskiner för små jobb. Mekanisk fräsning är effektivt och man kan fräsa mycket material på kort tid, man har också god kontroll över fräsdjupet.



Figur 1 Borttagning av vägmarkering med mekanisk fräsning. Foto: Victor Bergkvist, Svevia.

Fördelar med borttagning genom mekanisk fräsning:

- Det är en vanligt förekommande metod med flera möjliga utförare.
- Ny vägmarkering kan appliceras på samma plats.
- Med en ren och torr vägbana behövs ingen väntetid innan markeringen kan utföras. Dock kan försegling krävas för att säkerställa god vidhäftning.

Nackdelar med borttagning genom mekanisk fräsning:

- Det blir ett synligt spår i vägbanan.
- Om beläggningen är grov kan vägmarkeringsrester finnas kvar.

2.1.2. Vattenblästring

Högtrycksvattenblästring utfördes av Stripe Hog Scandinavia med hjälp av en Stripe Hog SH 8000R. Vattenblästringen genomfördes på olika platser under våren och sommaren 2024, och flera materialprover skickades till VTI för analys.

Metoden består i att vatten under högt tryck, 40 000 psi, sprutas genom munstycken med roterande huvuden för att lossa vägmarkeringarna från asfalten, se Figur 2. Därefter suges det lösa materialet upp i en tank på lastbilen. SH 8000R är utrustad med två oberoende styrda blästerhuvuden och har ett vattenseparationssystem som gör att det insamlade materialet i huvudsak är torrt. Det använda vattnet samlades upp, behandlades ombord på lastbilen och omhändertogs på korrekt sätt efter rengöring.

Vattenblästring är en relativt snabb metod som orsakar mindre skador på beläggningen än fräsning. Det översta lagret av asfaltbindemedel tas bort och samtidigt sker viss polering av stenmaterialets yta.

Graden av borttagning beror på vattentrycket och fordonets hastighet. Eftersom utrustningen har ett vakuumsugssystem för vatten och lossade partiklar blir ytan ren, betydligt renare än vid fräsning. Dock måste ytan torka helt innan ny vägmarkering kan appliceras.

Fördelar med borttagning med högtrycksvattenblästring:

- Det uppstår inga bestående skador, även om ytan är mycket grov.
- Vägytan blir mycket ren.

Nackdelar med borttagning med högtrycksvattenblästring:

- Risk för polering av stenmaterialet.
- Applicering av vägmarkering kan inte göras förrän ytan torkat.



Figur 2 Borttagning av vägmarkering med högtrycksvattenblästring. Foto: Hanna Fager, VTI.

2.2. Återvinningsprocesser

De två huvudsakliga metoderna för insamling av vägmarkeringar – mekanisk fräsning (MM) och vattenblästring (WB) – gav material med olika egenskaper. Mekanisk fräsning gav stora flagor och fragment av vägmarkeringsmaterial, blandade med grus, bitar av asfalt samt finare partiklar såsom sand och vägdamm, se Figur 3. Vattenblästring gav däremot främst fina fraktioner utan grova partiklar, se Figur 5. Utöver vägmarkering innehöll de insamlade WB-materialen även stora mängder sand, silt, lera och bitumenrester. Eftersom egenskaperna hos materialen som samlats in med de olika metoderna skiljde sig åt krävdes olika angreppssätt i de efterföljande återvinningsprocesserna.

Det första steget i separationen av det termoplastiska materialet som samlats in genom mekanisk fräsning från asfalt, grus och finpartikulärt material utfördes med en motordriven vibrationssikt med siktstorlekar 16 mm – 10 mm – 8 mm – 4 mm – 2 mm, följt av tvättning med kranvatten. Därefter separerades det termoplastiska materialet från återstående grus och asfalt genom manuell sortering. Endast fraktioner större än 8 mm sorterades.

Efter den första grovsorteringen smältes materialet och fick rinna genom ett 3 mm metallnät för att säkerställa att större partiklar, som potentiellt skulle kunna skada appliceringsutrustningen, inte längre fanns kvar i materialet. Det termoplastiska materialet fick därefter stelna i aluminiumformar som enkelt kunde tillsättas i nya materialformuleringar, se Figur 4. Det återvunna materialet blandades sedan med jungfruliga råmaterial enligt Svevias produktspecifikation för materialet Svevia E 150 P5. Tillsatsen av återvunnet material från mekanisk fräsning i blandningarna var 10, 20 respektive 30 viktprocent.



Figur 3 Från vänster till höger: (1) Insamlat material från mekanisk fräsning, bestående av en blandning av termoplastisk vägmarkering, asfalt, grus och vägdamm; (2) material efter en första siktning; (3) material under tvättprocessen; och (4) tvättat och siktat material, redo för att smältas till block.



Figur 4 Omsmältning av rengjord termoplastisk vägmarkeringsmassa. Foto: Svevia.

För materialen som samlades in med vattenblästring varierade egenskaperna mellan olika partier. Jämfört med det frästa materialet bestod alla partier av finfraktioner, men varierande mängder lerhaltigt material gjorde att vissa partier klumpade ihop sig, se särskild WB5 och WB7 i Figur 5. Totalt valdes åtta enskilda material ut för den inledande analysen. Efter initiala analyser valdes tre av de mest lovande kandidaterna för framställning av nya vägmarkeringsformuleringar. Inga ytterligare förbehandlings utfördes före blandning med jungfruliga råmaterial. Precis som för de frästa materialen var basen Svevias E 150 P5, men tillsatsen av återvunnet WB-material i blandningarna var 10 viktprocent.



Figur 5 Åtta olika materialprover som samlats in med vattenblästring (WB1-WB8).

2.3. Laboratorieanalyser

Tabell 1 Översikt över laboratorieanalyser och fälttester av vägmarkeringsmaterial innehållande återvunna komponenter. ger en översikt över de laboratorieanalyser som gjorts av materialen samt vilka funktionsparametrar som mätts vid fältförsöken på provfältet. Det bör noteras att råmaterialen som erhöles från vattenblästring bestod av åtta olika partier (märkt WB1–WB8). Varje material utvärderades med avseende på kulör och baserat på detta valdes de tre ljusaste materialen ut (WB4, WB6 och WB8) för tillsats i nya termoplastiska vägmarkeringsformuleringar och fortsatt analys, inklusive bindemedelshalt, premixhalt och titandioxidhalt samt bestämning av kulör, mjukpunkt och stämpelbelastningsvärde. Av totalt sex formuleringar med återvunnet termoplastiskt material valdes tre för applicering och utvärdering vid NordicCerts provfält i Norge.

För bestämning av partikelstorleksfördelning användes en siktmaskin av typen Pascall med standardiserade testsiktare från 0,063 mm till 16 mm. Den totala siktnings tiden var 5 minuter. Andelen termoplastiskt vägmarkeringsmaterial bestämdes endast för materialet som samlats in genom mekanisk fräsning och begränsades till partikelstorlekar >2 mm. Andelen termoplastiskt vägmarkeringsmaterial bestämdes med avseende på massa, med en våg med noggrannhet på 0,1 g och nollpunktskorrektion.

Bindemedelshalt och premixhalt bestämdes enligt metoderna i SS-EN 12802 [31].

Titandioxidinnehållet beräknades utifrån bestämning av titaninnehåll via ICP-SFMS enligt SS-EN ISO 17294-2 [32] efter LiBO₂-fusion.

Mjukpunkten bestämdes enligt Wilhelmi-metoden, enligt proceduren i SS-EN 1871 [33], med glycerol som testvätska. Även stämpelbelastningsvärde bestämdes enligt metoden i SS-EN 1871 vid en temperatur på 20 °C.

Mätning av kulör omfattar luminanskoefficient β och kromaticitetskoordinaterna (x,y) för materialen. Mätningarna utfördes enligt SS-EN 1436 [34] och SS-EN 1871 [33], med en portabel spektrofotometer med mätgeometri 45°/0°, 2° standardobservatör och standardljus D65. Medelvärden beräknades från 10 individuella mätpunkter för både finkorniga material (1–2 mm) insamlade via vattenblästring, för större bitar av material (1–2 cm) insamlade via mekanisk fräsning samt för laborieprover som förberetts genom smältning och blandning med återvunnet termoplastiskt material från både vattenblästring och mekanisk fräsning.

Ett stereomikroskop utrustat med en digitalkamera användes för att utvärdera kvaliteten på glaspärlorna i de insamlade materialen. Kvalitetsbedömningen baserades på de typer av defekter som listas i SS-EN 1423 [35].

Tabell 1 Översikt över laboratorieanalyser och fälttester av vägmarkeringsmaterial innehållande återvunna komponenter.

Laboratorieprovning	Mekanisk fräsning (MM)				Vattenblästring (WB)	
	Råmaterial	10 %	20 %	30 %	Råmaterial	10 %
Partikelstorleksfördelning	x				x	
Andel termoplastiskt material	x					
Bindemedelshalt	x	x	x	x	x	x
Titandioxidhalt	x	x	x	x	x	x
Premixhalt	x	x	x	x	x	x
Mjukpunkt		x	x	x		x
Stämpelbelastningsvärde		x	x	x		x
Kulör		x	x	x	x	x
Mikroskopi	x				x	
Material applicerade på provfält		x	x	x		
Retroreflektionskoefficient och luminanskoefficient		x	x	x		
Kulör		x	x	x		
Friktion		x	x	x		

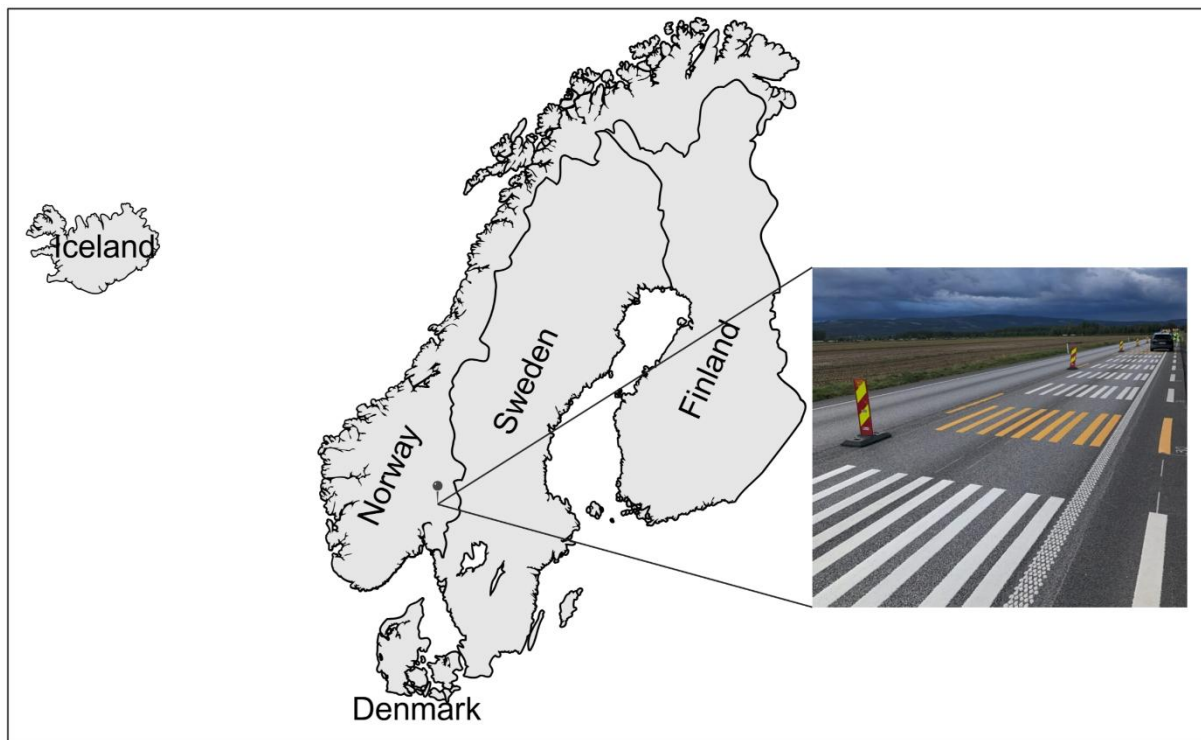
2.4. Fältförsök

2.4.1. Beskrivning av provfältet

Alla vägmarkeringsmaterial som används på statliga vägar i Danmark, Finland, Island, Norge och Sverige måste testas och certifieras för nordiskt klimat och förhållanden. Detta sker för närvarande genom NordicCert, det nordiska certifieringssystemet för vägmarkeringsmaterial. Certifieringen bedömer funktion i fältförsök enligt kraven i SS-EN 1824 [36], med mätning av funktionsparametrar som retroreflektionskoefficient (R_L) under torra och våta förhållanden, luminanskoefficient under diffus belysning (Q_d), friktion och kromaticitetskoordinater. Funktionsmätningarna genomförs dels några veckor efter applicering på provfältet (initialmätningar) samt följs upp efter ett och två år. Materialen klassificeras därefter baserat på vilka hjulpassageklasser de uppfyller med bibehållen funktion.

Platsen för provfältet för utvärdering av de återvunna termoplastiska materialen är belägen i östra Norge, längs riksväg 2, cirka 180 km nordost om Oslo. Sträckan är en rak, plan, tvåfilig landsväg med 9 m körbana och hastighetsbegränsning 90 km/h. Beläggningen består av ett slitlager av typen SKA 11 applicerad 2022, med grovhetsklass RG2 (medeldjup 0,60–0,90 mm). Den årliga genomsnittliga dygnstrafiken (ÅDT) är cirka 3 200 fordon per dag, varav tunga fordon utgör cirka 15 % av den totala trafiken [37]. Det uppskattas att 50–55 % av fordonen använder dubbdäck under vinterperioden. Ytterligare information om provfältet finns i NordicCerts instruktion [38].

Vid fältstudierna mäts årligen både trafikvolym och fordonens tvärgående placering i vägbanan. Testmaterialen appliceras i rader med tio linjer i trafikriktningen, se Figur 6.



Figur 6 Den geografiska positionen för NordicCerts provfält samt ett exempel över materialens placering på vägbanan vid provning.

2.4.2. Applicering av material på provfältet

I september 2024 applicerades tre termoplastiska vägmarkeringsmaterial innehållande 10 %, 20 % respektive 30 % återvunnet termoplastiskt material vid NordicCerts provfält. De testade materialen applicerades som plana (typ I) markeringar med en tjocklek på 3 mm. Appliceringen gjordes manuellt med en 15 cm bred skopa.

Pulverblandningar av jungfruligt termoplastmaterial introducerades i en smältgryta, och när pulvret smält tillsattes block av återvunnet termoplastmaterial. Smältgrytan var utrustad med indirekt oljeuppvärmning och hydraulisk omrörning. När appliceringstemperaturen (ca 200 °C) nåtts fick materialet homogenisera i en timme innan applicering.

Samtliga material applicerades under torra förhållanden med vindhastigheter på 3–4 m/s, vägyttemperatur 13–17 °C, lufttemperatur 13–15 °C och relativ luftfuktighet 62–68 %.

Varje material applicerades i tio longitudinella linjer (250 cm långa, 15 cm breda, 15 cm mellanrum), nio inom körfältet och en på vägrenen som referens utan hjulpassager. Appliceringen genomfördes utan avvikelser och de återvunna materialen uppförde sig på samma sätt som formuleringar med 100 % jungfruligt material.

Tjockleken kontrollerades vid applicering. För varje rad placerades en stålplatta i slutet av en linje där flest hjulpassager förväntas. Tjockleken mättes på stålplattan och medeltjocklek beräknades även utifrån vikt och materialets densitet. Dessutom kontrollerades slumpmässigt utvalda linjer med ett portabelt mätinstrument. Alla material uppfyllde specifikation, med tjocklekar på 2,9 mm, 3,1 mm och 3,1 mm (inom gränsen 3,5 mm).

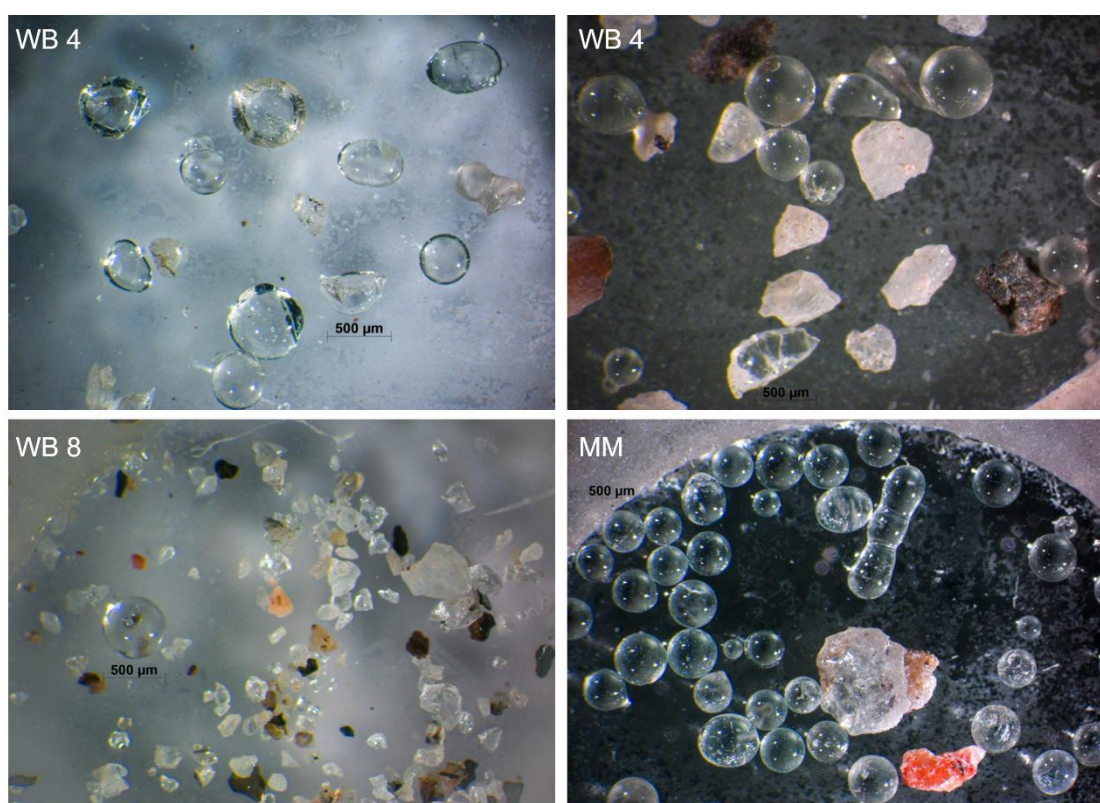
I samband med appliceringen ströddes även ytglas och friktionsmedel ut över materialen (så kallat drop on). Det aktuella drop on-materialet var Swarco Swarcoflex 180-850 H GG20, en produkt som består av 80 % glaspärlor (180–850 µm) och 20 % glasgranulat (250–850 µm). Andelen drop on var 350–430 g/m² och spreds med en specialbyggd glasspridare.

3. Resultat och diskussion

3.1. Materialinsamling och återvinningsprocess

Vattenblästring lämnar färre spår på vägytan än mekanisk fräsning, vilket gör den till den föredragna metoden utifrån ett beläggningssperspektiv. Metoden avlägsnar dock fortfarande beläggningens översta bitumenlager och polerar stenmaterialet. Hur mycket som följer med vid processen beror på vattentrycket och fordonets hastighet, vilket gör att processen kan påverkas i hög grad av operatören. Den typ av högtrycksvattenblästringssystem som använts i detta projekt suger upp både vatten och avlägsnat material från vägytan, vilket gör att vägytan är betydligt renare efter vattenblästringsprocessen än efter fräsningsprocessen. Fordonen är dessutom utrustade med effektiva vattenreningssystem, vilket möjliggör utsläpp av vattnet utan ytterligare åtgärder [39]. Fördelarna med den skonsamma borttagningen begränsas dock av effektiviteten vid separation av återvunnet vägmarkeringsmaterial från rester som fina partiklar av bitumen, lera, silt och sand.

Den mekaniska fräsningen orsakade större skador hos beläggningen. En av orsakerna till detta i just denna studie var att frästrummans bredd var 50 cm, medan vägmarkeringen endast var 15 cm bred. Därmed avlägsnades cirka 35 cm asfalt i onödan. Detta försvårade sedan återvinningsprocess genom att stora mängder grus och asfaltrester fanns med i det återvunna materialet. För att förbättra effektiviteten i både borttagnings- och återvinningsstadiet rekommenderas att man i framtida studier anpassar fräsningen med avseende på fräsbredd, fräsdjup och fordonshastighet, för att undvika onödig asfaltborttagning.



Figur 7 Mikroskopibilder av glaspärlor från materialprover WB4 (översta raden), samt WB8 (nedre bilden till vänster) och MM (nedre bilden till höger). Notera att de icke-sfäriska transparenta partiklarna är friktionsmedel.

För att bedöma om insamlingsprocesserna på något sätt skadar de glaspärlor som finns i materialet, och som är en avgörande komponent för att säkerställa god synbarhet, undersöktes delprover av material insamlat med fräsning samt tre delprover insamlat med vattenblästring. Bindemedel och

pigment avlägsnades först, proverna siktades så att endast storleksfraktioner 0,063–1 kvarstod och kvarvarande komponenter undersöktes i ett stereomikroskop, se exempel i Figur 7.

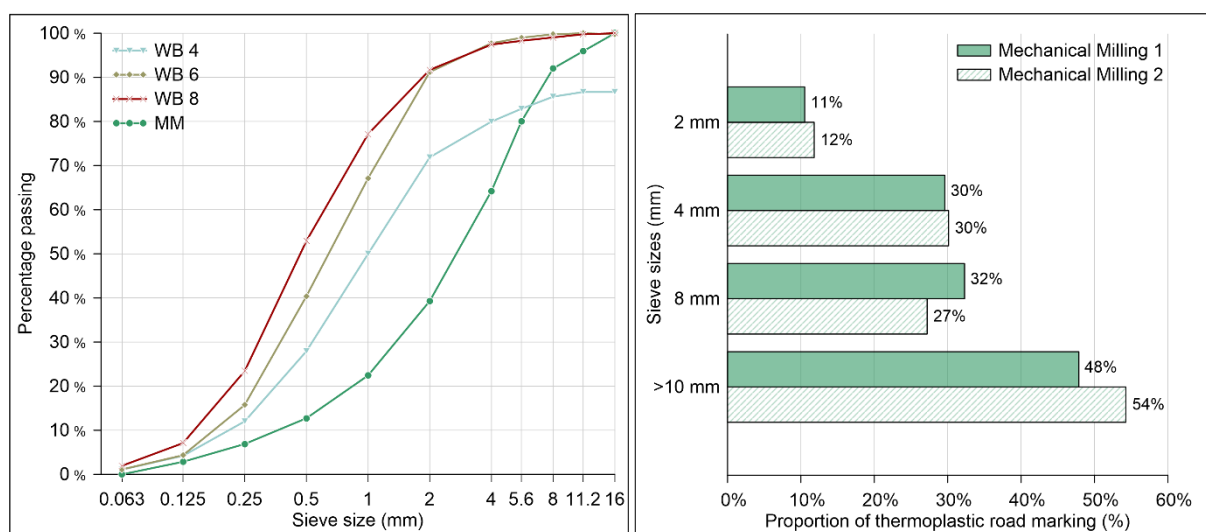
Endast ett fåtal glaspärlor visade synliga skador, betydligt under den tillåtna gränsen på 20 viktprocent defekta pärlor enligt SS-EN 1423 [35] och SS-EN 1424 [40], vilket visar att metoderna är tillräckligt skonsamma för återvinning. Resultaten visar att MM och WB4 innehåller en betydande andel glaspärlor (storlek 500–800 µm), medan WB8 innehåller få pärlor. WB8 innehåller fraktioner av krossat glas med storlek omkring 100–300 µm, typiska för den typ av friktionsmedel som blandas med ytglaset vid applicering.

En stor del av glaspärlorna hade oregelbunden form, ofta avlång eller timglasformad snarare än rund, och vissa glaspärlor hade luftbubblor, ytfel och sprickor. I WB6 upptäcktes inga glaspärlor alls.

Glaspärlor finns i olika kvaliteter och rundhet mäts enligt standard EN 1423 och EN 1424. Wenzel, Burghardt [41] anger att standardglaspärlor som framställs av återvunnet planglas ska uppnå >80 % normativ rundhet, vilket är lägre än pärlor av premiumkvalitet. Premium-pärlor används dock sällan på grund av högre kostnad [17, 42].

Analysen av partikelstorleksfördelningen bekräftade att materialet som samlats in genom mekanisk fräsning var grövre än materialet som samlats in med vattenblästring: 40 % av MM-materialet var finare än 2 mm, jämfört med 70–90 % för WB-materialen samtidigt som cirka 15 % av MM-materialet var grövre än 16 mm. För WB-materialen var endast en liten andel av partiklarna grövre än 2 mm, vilket gjorde det svårt att effektivt separera vägmarkeringsmaterial från föroreningar. Detta kan komma att utgöra ett problem för storskalig återvinning. En stor mängd kvarvarande föroreningar i det återvunna materialet kan påverka kulören och ljusheten negativt och därmed påverkas även de retroreflektiva egenskaperna hos vägmarkeringarna som innehåller återvunna komponenter, särskilt om det återvunna materialet även innehåller bitumen löses upp i det termoplastiska bindemedlet.

En granulometrisk analys av MM-materialet visade att vägmarkering utgjorde 48–54 % av materialet i storleksfraktionen >10 mm, 27–32 % i 8 mm-fraktionen, 30 % inom 4 mm-fraktionen och 11–12 % inom 2 mm-fraktionen. Resterande material i varje sikt bestod av grus, sand och asfaltsrester. Dessa resultat tyder på att framtida forskning bör prioritera förbättringar av återvinningsprocesserna för att undvika onödig borttagning av asfalt, samt fokusera återvinningsinsatserna på partikelstorlekar större än 10 mm, eftersom de sannolikt är mest kostnadseffektiva att separera från resterande material. Material ner till 4 mm kan också övervägas för återvinning men för att effektivt separera dessa krävs mer avancerade och effektiva metoder.



Figur 8 Medelkornstorleksfördelning för MM, WB4, WB6 och WB8 (vänster) samt andel termoplastiskt vägmarkeringsmaterial i MM-delprover som stannat på siktat med maskvidder från 2 till >10 mm (höger).

3.2. Laboratorieanalys av återvunna råmaterial

Den komplexa strukturen hos termoplastiska vägmarkeringsmaterial är en av anledningarna till att det inte är möjligt att till fullo utvärdera vägmarkeringsmaterialets funktion genom laborietester. Tidigare låg laborietester till grund för certifiering av termoplastiska vägmarkeringsmaterial i de nordiska länderna, men metoden övergavs till förmån för fältförsök på kontrollerade provfält.

Funktionen hos termoplastiska vägmarkeringar påverkas av materialets individuella komponenter – bindemedel, fyllnadsmedel, pigment, inblandningsglas och tillsatser. Både typ och mängd av varje komponent måste anpassas till de faktiska klimatförhållandena i den region där materialet ska användas, men också till typen av appliceringsutrustning. Vid användning i krävande förhållanden med många fordon med dubbdäck och klimat som kräver återkommande vinterunderhåll är användningen av mjukgörare i form av polymerer avgörande för funktion. Viskositeten måste också justeras för att säkerställa god flödesförmåga i utrustningen, medan materialets tixotropi påverkar dimensionsstabiliteten.

Bindemedelshalten (inklusive alla organiska komponenter, även tillsatser som polymerer och oljor) i termoplastiska vägmarkeringsmaterial är normalt runt 20 % [43]. I de återvunna materialen varierade bindemedelshalten mellan $\bar{x}$ 7,8 % och $\bar{x}$ 21,7 % för de vattenblästrade materialen och $\bar{x}$ 16,7 % för det frästa materialet, se Tabell 2. Variationen mellan olika partier vattenblästrade material är stor, men för dessa material gjordes ingen separation mellan vägmarkering och föroreningar (t.ex. sand, lera och vägdamm) före analysen. Analysen av det frästa materialet utfördes på utvalda större bitar som gick att separera från asfalt, grus, sand och vägdamm.

Tabell 2 Sammanställning av materialegenskaper för åtta partier vattenblästrade material (WB) och ett material som bearbetats med mekanisk fräsning (MM).

Laboratieprovning	WB1	WB2	WB3	WB4	WB5	WB6	WB7	WB8	MM
Bindemedelshalt (%)*	7,8	13,4	6,9	11,7	10,6	22,8	11,4	21,7	16,7
Titandioxidhalt (%)	-	-	-	3,18	-	7,37	-	7,87	5,48
Premixhalt (%)*	80,2	63,6	82,7	69,0	75,7	12,5	69,5	29,2	69,5
Luminanskoefficient, β^{**}	0,05	0,08	0,10	0,17	0,09	0,30	0,07	0,24	0,53

*Medel av 3 värden. **Medel av 10 värden.

Låg bindemedelshalt, särskilt för WB1, WB3 och WB5, kan påverka formuleringen av nya produkter med återvunna komponenter. Bindemedelshalt och typen av bindemedel måste verifieras som en del av kvalitetskontrollen vid återvinnings så att tillverkaren kan kompensera för eventuella reducerade nivåer och säkerställa önskad funktion.

För det frästa material är en jämförelse med referensmaterialet relevant eftersom båda motsvarar samma produkt. Den något lägre bindemedelshalten jämfört med produktspecifikationen är förväntad, eftersom det inte gick att helt avlägsna föroreningar i återvinningsprocessen. För WB-materialen är ursprung och typ av vägmarkering okända. De flesta WB-material innehåller stora mängder rester som påverkar den relativa bindemedelshalten. För WB6 och WB8 är bindemedelshalten oväntat högt, vilket tyder på att dessa material kan vara vägmarkeringsfärg snarare än termoplast. Detta stöds även av det låga antalet glaspärlor i WB8: de få glaspärlor och fragment av krossat glas som fanns i provet kan komma från drop on-materialet. Eftersom bindemedelstypen inte undersöktes inom ramen för detta projekt kan inte misstanken om att det rör sig om vägmarkeringsfärg bekräftas med säkerhet.

Titandioxidhalten är avgörande för den vita kulören och för materialets ljushet (luminanskoefficient). Titandioxiden bidrar också till att öka glaspärlornas retroreflektiva egenskaper [44]. I WB-materialen var titandioxidhalten för WB4, WB6 och WB8 mellan 3,18 och 7,87 %. Eftersom materialen inte separerades från föroreningar före analysen påverkas de relativa koncentrationerna av mängden föroreningar i varje prov. Jämförelse mellan WB4 och WB8 visar att bindemedels- och

titandioxidhalten är nästan dubbelt så högt i WB8 (21,7 % vs. 11,7 % och 7,87 % vs. 3,18 %), medan premixhalten är mindre än hälften (29,2 % vs. 69,0 %). Skillnaderna tyder på att WB8 innehåller mer vägmärkeringsmaterial, vilket stöds av den högre luminanskoefficienten.

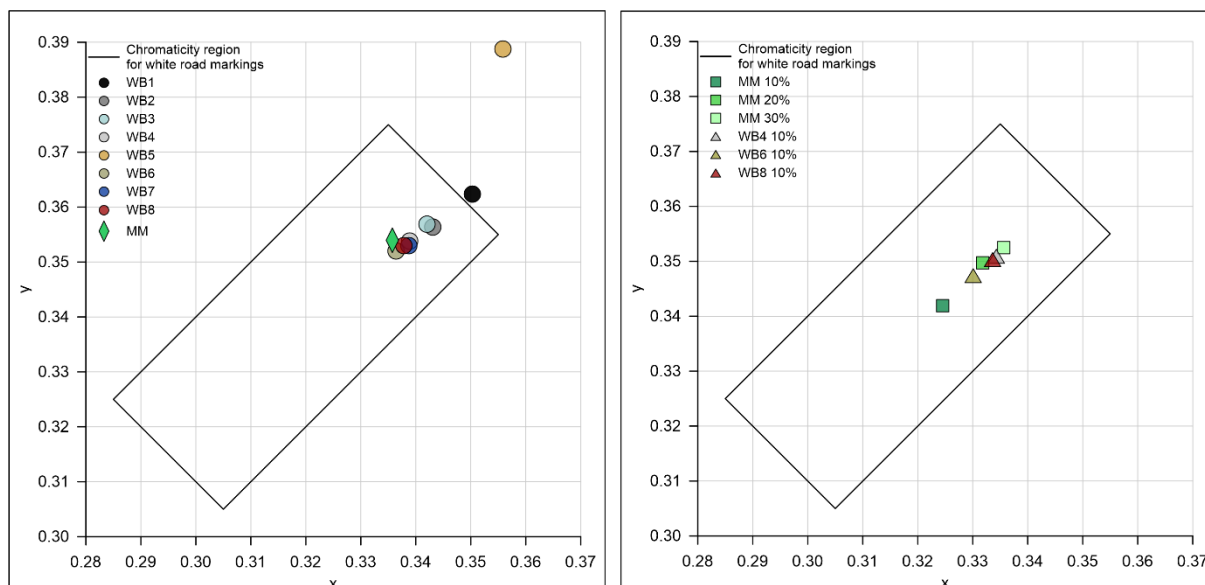
WB6 är lik WB8 när det gäller bindemedels- och titandioxidhalt (22,8 % jämfört med 21,7 % respektive 7,37 % jämfört med 7,87 %), men premixhalten är ungefär hälften, 12,5 % jämfört med 29,2 %. WB6 har den högsta bindemedelshalten av alla återvunna material, men den lägsta premixhalten. Titandioxidhalten är hög, vilket sammanfattningsvis tyder på att WB6 innehåller stora mängder vägmärkeringsmaterial. Mikroskopi visar inga glaspärlor, vilket inte är överraskande eftersom premixhalten är så låg. En annan förklaring kan vara att WB6 består av vattenbaserad vägmärkeringsfärg. För MM-materialet är titandioxid- och premixhalterna i linje med vad som förväntas enligt produktspecifikationen (se referensmaterialet i Tabell 3).

Kulören för de återvunna materialen bestämdes som beskrivet ovan och presenteras i Tabell 2 (luminanskoefficient) och i Figur 9. Kromaticitetskoordinaterna (x,y) för två av WB-materialen ligger utanför gränsvärdena (markerat med svart ruta i Figur 9) för vita vägmärkeringar. WB5 är betydligt utanför det tillåtna området och förskjuts mot den gula sidan av kromaticitetsdiagrammet. Detta är väntat, eftersom det mesta av vägmärkeringsmaterialet i detta parti var gult. WB5 ligger dock även utanför gränsvärdena för gula vägmärkeringar (ej visat), vilket indikerar en hög andel föroreningar i provet. WB1 ligger något utanför gränsvärdena, mot den orange sidan av kromaticitetsdiagrammet. Även om WB1 är ett vitt material så har det den lägsta luminanskoefficienten bland alla återvunna material ($\beta = 0,05$) och en av de lägsta bindemedelshalterna (7,8 %), vilket tyder på att andelen vägmärkeringsmaterial i WB1 är mycket låg. Följaktligen kan kromaticitetskoordinaterna ha påverkats av föroreningar som bitumen, lera, silt och sand.

WB2–WB8 (exklusive WB5) och MM ligger relativt nära varandra i kromaticitetsdiagrammet, alla med marginal inom gränsvärdena för vita vägmärkeringar. Luminanskoefficienten för MM-materialet ($\beta = 0,53$) är betydligt högre än för WB-materialen, men detta kan förklaras av att mätningen utfördes på större flagor av MM-material som separerats från föroreningar och tvättats före mätning. .

3.3. Laboratorieanalys av formuleringar med återvunnet råmaterial

Kromaticitetskoordinaterna (x,y) för formuleringar med återvunnet råmaterial visas till höger i Figur 9, där MM-material representeras av fyrkanter och WB-material av trianglar. En tydlig trend kan observeras: ökande andel MM-material i formuleringarna leder till en färgförskjutning mot den gula regionen i kromaticitetsdiagrammet (uppåt höger). Samtidigt minskar luminanskoefficienten från $\beta = 0,69$ till $\beta = 0,63$ och vidare till $\beta = 0,54$ (se Tabell 3). Det är inte överraskande att kromaticitetskoordinaterna skiftar mot det återvunna MM-materialet vid ökad halt återvunnet råmaterial, men den snabba minskningen av luminanskoefficienten är oväntad. Tillsats av så lite som 30 % återvunnet MM-material orsakar en betydande minskning av materialets ljushet.



Figur 9 Vänster: (x,y)-kromaticitetskoordinater för återvunna råmaterial (MM och WB1–WB8). Höger: (x,y)-kromaticitetskoordinater för termoplastiska material innehållande återvunnet material (MM 10 %, MM 20 %, MM 30 %, WB4 10 %, WB6 10 % och WB8 10 %).

Den observerade minskningen i luminanskoefficient med ökad återvinningshalt tillskrivs troligen bitumenrester i det återvunna MM-materialet. Denna förorening, som är mörkare och mindre reflekterande, minskar materialets totala reflektivitet. Ändringar i titandioxidens dispersion kan påverka optiska egenskaper, men detta anses osannolikt här eftersom sammansättningen och bearbetningsförhållandena var desamma för alla nivåer av inblandning av återvunnet råmaterial. För WB-materialen är luminanskoefficienten låg (0,50–0,59) även vid endast 10 % inblandning.

Luminanskoefficienten för termoplastiska vägmarkeringar delas in i sex klasser enligt SS-EN 1871 [33]: LF1 och LF2 för gula material och LF3–LF6 för vita. Minimikravet för vita material är $\beta \geq 0,65$ (LF3), vilket endast uppnås av MM 10 %. Kromaticitetskoordinaterna för formuleringar med 10 % WB4, WB6 och WB8 skiftar mot den blå regionen (nedåt vänster) jämfört med råmaterialen, på grund av titandioxidens effekt i de nya formuleringarna.

För formuleringarna med olika typer och andelar återvunnet råmaterial var bindemedelshalten 19,7 % för MM 10 %, 21,0 % för MM 20 %, och 18,4 % för MM 30 %; 17,7 % för 10 % WB4 och 19,1 % för både 10 % WB6 och 10 % WB8. Referensmaterialet har 18,4 % bindemedel enligt produktspecifikationen. MM 20 % hade förvånansvärt hög bindemedelshalt vilket troligen beror på att provtagning av material i samband med applicering på provfältet gjordes när det var lite material kvar i smältgrytan, vilket gör att provet inte är representativt.

Titandioxidhalten varierade mellan 5,06 % och 5,43 %, jämfört med 6,0 % för referensmaterialet. Även om variationerna i råmaterialens titandioxidhalt var stora, gav detta endast mindre effekter på slutlig koncentration, vilket är logiskt eftersom återvinningsandelen endast var 10–30 % och den titandioxidhalten i råmaterialen låg mellan 3 % och 8 %.

Mjukpunkten för referensmaterialet är cirka 80 °C. Formuleringar med 10 % återvunnet material hade mjukpunkt på 82–84 °C. MM 30 % hade en mjukpunkt på 93 °C och MM 20 % hade en mjukpunkt på 99 °C. Alla formuleringar uppfyllde klass SP2 (≥ 80 °C) enligt SS-EN 1871, utom MM 20 % som klassas som SP3 (≥ 95 °C).

Stämpelbelastningsvärde delas i sex klasser (IN0–IN5) enligt SS-EN 1871. Jämförelsevärde för referensmaterialet är 25 s (IN1), medan andra material låg mellan 5–42 s och uppfyllde IN1, utom WB4 10 % som klassas som IN2 (46 s–2 min). MM 20 % ett lågt stämpelbelastningsvärde, endast 5 s,

vilket tyder på att provtagningen inte var representativ. Materialet förväntas ändå fungera tillfredsställande vid fältförsöken.

Tabell 3 Sammanställning av materialegenskaper för referensmaterialet (Svevia E 150 P5) och material innehållande återvunna råmaterial (WB = insamling med vattenblästring, MM = insamling med mekanisk fräsning).

Laboratorieprovning	Referens-material†	MM 10%	MM 20%	MM 30%	WB4 10%	WB6 10%	WB8 10%
Bindemedelshalt (%)*	18.9	19.7	21.0	18.4	17.7	19.1	19.1
Titandioxidhalt (%)	6.0	5.26	5.33	5.10	5.43	5.06	5.13
Premixhalt (%)	75.1	-	-	-	-	-	-
Luminanskoefficient, β^{**}	0.80	0.69	0.63	0.54	0.50	0.59	0.53
Mjukpunkt (°C)***	80	83	99	93	82	84	84
Stämpelbelastningsvärde (s)****	25	26	5	35	53	42	38

† Materialsammansättningen är tagen från produktspecifikationen publicerad i [45]. *Medel av 3 mätningar. **Medel av 10 mätningar. ***Medel av 2 mätningar. ****Medel av 4 mätningar.

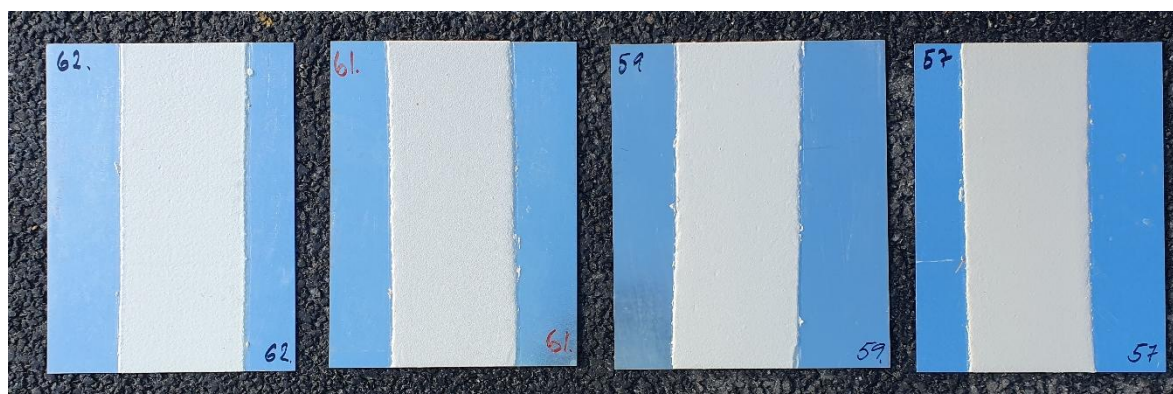
3.4. Initialmätningar på provfältet

Materialen tjocklek mättes med en Zehntner ZMM 5000 tjockleksmätare på minst 10 punkter och kontrollerades även genom vikten av materialet på en stålplatta.

Initiala funktionsmätningar av vägmarkeringarna utfördes två veckor efter appliceringen, d.v.s. i oktober 2024. Vid mätningarna var vädret mestadels molnigt med luft- och vägutemperaturer på 15 °C. De utvärderade parametrarna var retroreflektionskoefficient R_L , luminanskoefficienten Q_d , kulör och friktion. R_L , Q_d och kulör mättes på helt torra markeringar. En handhållen reflektometer användes för att mäta R_L och Q_d . Mätningarna gjordes på tre punkter per linje inom det mätområde som definieras i SS-EN 1824 [36] och medelvärde av dessa tre mätningar beräknades för varje linje.

Kromaticitetskoordinaterna mättes på en punkt per linje med en portabel spektrofotometer med mätgeometri 45°/0°, 2° standardobservatör och standardljus D65.

Friktion utvärderades med en Portable Friction Tester (PFT) version 4 med mätning längs med mitten av varje linje. Resultaten beräknades som medelvärde av cirka 70 mätpunkter per linje. Friktionen mättes på våta markeringar och värdena omvandlades till SRT-enheter.



Figur 10 Ett vitt referensmaterial till vänster, följt av MM 10%, MM 20%, and MM 30%, applicerat på stålplattor för tjockleksmätning vid NordicCerts provfält i Norge 2024.

Funktionkraven för vita typ I-markeringar är $R_L \geq 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, $Q_d \geq 130 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, friktion ≥ 50 SRT-enheter och kromaticitetskoordinater inom det vita området som anges i SS-EN 1436 [34].

Resultaten från de initiala mätningarna för MM 10 %, MM 20 % och MM 30 % presenteras i Tabell 4 och Figur 10. Materialen får en tydlig gulare nyans med ökande MM-innehåll, mest uttalad för MM 30 %. MM 30 % uppfyller inte funktionskraven, eftersom Q_d -värdet ($111 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$) ligger under gränsvärdet $130 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. Däremot uppfyller MM 10 % och MM 20 % samtliga utvärderade funktionsparametrar.

Testerna visar att material med 10–20 % återvunnet MM-material utan ytterligare åtgärd kan tillsättas i nya formuleringar av vägmarkering, utan negativa effekter på initial funktion. Resultaten indikerar att återvunnet material på dessa nivåer inte äventyrar materialets kvalitet.

*Tabell 4 Resultat från initialmätning utförd ca två veckor efter utläggning på provfältet. Krav för godkännande: $R_L \geq 150$, $Q_d \geq 130$, friktion $\geq 0,47$. Angivna värden är medelvärden av mätningar på de nio linjer som är placerade i körfältet. *Anger ett underkänt värde.*

Funktionsegenskap	MM 10%	MM 20%	MM 30%
Retroreflektionskoefficient, R_L ($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$)	224	214	200
Luminanskoefficient, Q_d ($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$)	144	135	111*
Friktion, μ (SRT units)	52	52	53
Tjocklek [mm]	2.9	3.1	3.1
Kulör	$x=0,3367$	$x=0,3376$	$x=0,3400$
	$y=0,3532$	$y=0,3532$	$y=0,3545$

3.5. Miljöpåverkan av återvinning av termoplastiska vägmarkeringar

Denna studie har haft till syfte att validera ett koncept för återvinning och återanvändning av termoplastiska vägmarkeringar, med fokus på att bedöma teknisk genomförbarhet snarare än att genomföra en omfattande miljö- eller ekonomisk utvärdering. En livscykelanalys (LCA) har inte genomförts, eftersom detta låg utanför studiens begränsningar. En LCA bedömdes inte vara relevant då en storskalig återvinningsinfrastruktur saknas, och detta begränsar noggrannheten och relevansen av en sådan analys.

Ur ett materialsättningsperspektiv kan dock en 1:1-ersättning av jungfruliga råmaterial med återvunna motsvarigheter teoretiskt ge proportionella minskningar av växthusgasutsläpp och resursförbrukning. Det bör noteras att återvinningsprocesserna också kräver energi, liksom efterföljande nödvändiga steg som transport, partikelseparering, rengöring, etc. Trots dessa energiinvesteringar förväntas de vara avsevärt lägre än de som är förknippade med produktionen av jungfruliga råvaror, särskilt fossilt baserade bindemedel, syntetiska polymerer, utvinning och bearbetning av titandioxid samt tillverkning av glaspärlor.

4. Slutsatser

Återvinning av termoplastiska vägmarkeringar innebär både tekniska och ekonomiska utmaningar, främst på grund av materialets komplexa sammansättning, svårigheten att avlägsna asfaltsföroreningar från det återvunna materialet, samt det låga priset på jungfruliga råmaterial, vilket minskar det ekonomiska incitamentet för storskalig återvinning.

Denna studie jämför vattenblästring och mekanisk fräsning för materialinsamling. Vattenblästring orsakar mindre skador på vägytan men producerar fina partiklar som är svåra att separera från föroreningar. Dessutom var material insamlade med vattenblästring av okänd härkomst, och vissa satser innehöll troligen akrylbaserad vägmarkeringfärg, vilket skiljer sig kemiskt från termoplastiska vägmarkeringar och gör dem olämpliga att blanda. Mekanisk fräsning gav grövre partiklar, där över 50 % var större än 10 mm, vilket underlättar hantering i återvinningsprocessen. Ändå innehöll de betydande asfaltsföroreningar på grund av att fräsens bredd var betydligt större än vägmarkeringens. För att förbättra både borttagnings- och återvinningsprocessen bör framtida arbete fokusera på att optimera fräsparametrar som bredd, djup och fordonshastighet för att minimera oavsiktlig borttagning av asfalt.

Kulör- och ljushetsbestämningar visade att de flesta återvunna prover uppfyllde krav på kromaticitet, där mekaniskt frästa material uppvisade högst ljushet tack vare lägre kontaminering. Bindemedelshalten varierade kraftigt mellan prover och kan påverka formuleringar med återvunnet material. Vissa satser vattenblästrat material hade låga bindemedelshalter, medan andra visade oväntat höga bindemedelshalter, vilket tyder på att de kan härröra från färg snarare än termoplastisk massa. Noggrann kontroll av bindemedelsinnehåll och bindemedelstyp är avgörande för kvalitetssäkring av återvunna material och för att säkerställa funktionen i nya formuleringar.

Resultat från laborietester och initial utvärdering av vägmarkeringar applicerade i verklig trafik tyder på att inblandning av 10–20 % återvunnet material utan förbehandling är möjlig och inte försämrar funktionen. Långsiktig hållbarhet måste dock fortsatt utvärderas. Projektets resultat visar, för första gången, ett lovande och praktiskt tillvägagångssätt för att främja cirkulär materialanvändning för vägmarkeringar.

Referenser

1. Soilán, M., et al., *Segmentation and classification of road markings using MLS data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017. **123**: p. 94-103.
2. Administration, U.D.o.T.F.H., *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways 11th edition*. 2023, US Department of Transportation Federal Highway Administration.
3. Gunnarsson, M. and A. Mari, *Road marking and microplastics in Scandinavia - An overview of the available knowledge of microplastics in the Scandinavian road marking industry*. 2022, Skandinaviska vägmarkeringsföreningen.
4. Andersson-Sköld, Y., et al., *Mikroplast från däck- och vägsitage : en kunskapssammanställning*, in *VTI rapport*. 2020, Statens väg- och transportforskningsinstitut: Linköping. p. 138.
5. Järskog, I., et al., *Microplastic emissions from wear of road markings : overview and assessment for Swedish conditions*, in *VTI rapport 1207A*. 2024, Statens väg- och transportforskningsinstitut. p. 100.
6. Järskog, I., H. Fager, and M. Gustafsson, *Reply to road markings and microplastics - a critical literature review*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024. **132**.
7. Turner, A., A. Bridgwater, and E. Marshall, *Environmental transport and sorting of glass retroreflective microbeads and their potential as proxies for road marking paints*. Science of The Total Environment, 2024. **954**: p. 176057.
8. West-Clarke, Z. and A. Turner, *Contamination of Thames Estuary sediments by retroreflective glass microbeads, road marking paint fragments and anthropogenic microfibres*. Science of The Total Environment, 2024. **912**: p. 169257.
9. Yamamoto, K., et al., *Efficient pretreatment method for analyzing microplastics in urban road dust containing composite materials*. Water Environment Research, 2025. **97**(2): p. e70028.
10. Järskog, I., et al., *Concentrations of tire wear microplastics and other traffic-derived non-exhaust particles in the road environment*. Environment International, 2022. **170**: p. 107618.
11. CEN, *EN 1790:2013 Road marking materials - Preformed road markings*. 2013, European Committee for Standardization, Brussels.
12. CEN, *EN 1871:2020 Road marking materials - Paint, thermoplastic, and cold plastic materials - Physical properties*. 2020, European Committee for Standardization, Brussels.
13. Mirabedini, S.M., F. Zareanshahraki, and V. Mannari, *Enhancing thermoplastic road-marking paints performance using sustainable rosin ester*. Progress in Organic Coatings, 2020. **139**: p. 105454.
14. System, I.E., *Complementary Product Category Rules (c-PCR) to PRC 2019:14*. 2025.

15. Li, Y., et al., *Degradation behaviour and anti-UV ageing method of sustainable road marking materials for strong UV light area*. International Journal of Pavement Engineering, 2025. **26**(1): p. 2456737.
16. Cruz, M., A. Klein, and V. Steiner, *Sustainability Assessment of Road Marking Systems*. Transportation Research Procedia, 2016. **14**: p. 869-875.
17. Burghardt, T.E. and A. Pashkevich, *Materials selection for structured horizontal road markings: financial and environmental case studies*. European Transport Research Review, 2020. **12**(1): p. 11.
18. Dai, Y., et al., *Life cycle environmental impact assessment of titanium dioxide production in China*. Environmental Impact Assessment Review, 2024. **105**: p. 107412.
19. Maldybayev, G., et al., *Processing of titanium-containing ores for the production of titanium products: A comprehensive review*. Heliyon, 2024. **10**(3): p. e24966.
20. Middlemas, S., Z.Z. Fang, and P. Fan, *A new method for production of titanium dioxide pigment*. Hydrometallurgy, 2013. **131-132**: p. 107-113.
21. Garside, M. *Global titanium mining industry - statistics & facts*. 2023 2023-12-18 2024-01-26]; Available from:
<https://www.statista.com/topics/11141/titanium-industry-worldwide/#topicOverview>.
22. Gázquez, M.J., et al., *A Review of the Production Cycle of Titanium Dioxide Pigment*. Materials Sciences and Applications, 2014. **Vol.05No.07**: p. 18.
23. Karlsson, M.C.F., *Recycling of TiO₂ pigments from waste paint : process development, surface analysis, and characterization*. 2018, Göteborg: Chalmers University of Technology.
24. Khezri, S.M., S.M. Shariat, and S. Tabibian, *Evaluation of extracting titanium dioxide from water-based paint sludge in auto-manufacturing industries and its application in paint production*. Toxicology and Industrial Health, 2012. **29**(8): p. 697-703.
25. Nakouzi, S., et al., *A novel approach to paint sludge recycling: Reclaiming of paint sludge components as ceramic composites and their applications in reinforcement of metals and polymers*. Journal of Materials Research, 1998. **13**(1): p. 53-60.
26. Januri, Z., et al., *Yields Performance of Automotive Paint Sludge via Microwave Assisted Pyrolysis*. Applied Mechanics and Materials, 2014. **548-549**: p. 191-195.
27. Sanghvi, H. and J.L. Massingill, *Recycling paint overspray*. Journal of Coatings Technology, 2002. **74**(933): p. 143-145.
28. Frank, H. and H. Reinsberg, *Schriftenreihe 17 Verkehrssicherheit - Leitfaden Fahrbahnmarkierung*, D. Verkehrssicherheitsrat, Editor. 2014, Deutscher Verkehrssicherheitsrat: Bonn.
29. Yilmaz, B., et al., *Sustainable Thermoplastic Road Marking Paint Production from Natural Modified Rosins*. BioResources, 2024. **19**(2): p. 2160-2178.

30. Fager, H., et al., *Recovery methods, material characterization, and performance assessment of recycled thermoplastic road markings*. Case Studies in Construction Materials, 2025. **23**(e05072).
31. SIS, SS-EN 12802:2011 *Vägutrustning - Vägmarkeringar - Laboratoriemetoder för identifiering*. 2011, Svenska Institutet för Standarder.
32. SIS, SS-EN ISO 17294-2:2016 *Vattenundersökningar - Bestämning med induktivt kopplad plasma och masspektrometri (ICP-MS) - Del 2: Bestämning av ett antal utvalda grundelement och isotoper av uran*. 2016, Svenska Institutet för Standarder.
33. SIS, SS-EN 1871:2020 *Vägutrustning - Vägmarkeringar - Fysiska egenskaper*. 2020, Svenska Institutet för Standarder.
34. SIS, SS-EN 1436:2018 *Vägutrustning - Vägmarkeringar - Funktionskrav och testmetoder*. 2018, Svenska Institutet för Standarder.
35. SIS, SS-EN 1423:2012 *Vägutrustning - Vägmarkeringar - Ytglas och friktionsmaterial*. 2012, Svenska Institutet för Standarder.
36. SIS, SS-EN 1824:2020 *Vägutrustning - Vägmarkeringar - Fältprov*. 2020, Svenska Institutet för Standarder.
37. Trafikkdata. *Årsdøgntrafikk. Haslemosletta*. 2024 2024-02-29]; Available from: <https://trafikkdata.atlas.vegvesen.no>.
38. Fors, C., T.C. Johansen, and H. Fager, *Nordic certification system for road marking materials : Version 10:2024*, in VTI PM. 2024, Statens väg- och transportforskningsinstitut: Linköping. p. 59.
39. Beaulieu, M., Boily, F., Chamberland, J., Côté, M., Leclerc, G., Perreault, A, *Pavement Marking Technical Manual*. . 2019, Ministry of Transport, Gouvernement du Québec.: Québec, Canada.
40. SIS, SS-EN 1424 *Vägutrustning - Vägmarkeringar - Inblandningsglas*. 1997, Svenska Institutet för Standarder.
41. Wenzel, K.M., et al., *Glass Beads for Road Markings: Surface Damage and Retroreflection Decay Study*. Applied Sciences, 2022. **12**(4): p. 2258.
42. Semadi, H.F. and M.F. Ayob, *IMPROVING ROAD SAFETY AT ACCIDENT-PRONE AREAS: A COMPARISON BETWEEN GLOW-IN-THE-DARK AND CONVENTIONAL ROAD MARKING*. Planning Malaysia, 2024. **22**(5): p. 510-526.
43. Naidoo, S., *The development of a thermoplastic road marking material standard*. 2017, University of Pretoria.
44. Smadi, O., et al., *Recommended Laboratory Test for Predicting the Initial Retroreflectivity of Pavement Markings from Glass Bead Quality*. Transportation Research Record, 2014. **2440**(1): p. 94-102.
45. Norge, E., *Thermoplastic road marking material E 150 P5*. 2024.

