

# Användning av $\text{TiO}_2$ nanopartiklar för fotokatalytisk självrening på vägar

## En kort litteraturöversikt

Fredrik Hellman



## Förord

Detta projekt har finansierats av VTI för att göra en kunskapsöversikt inom nanoteknik för vägar. Syftet är att undersöka potentialen att använda tekniken i svenska vägar och se möjligheter till framtida svenska forskningsprojekt inom området.

Ett stort tack till Tore Klevebrant på CEMENTA Research AB för hjälp att hitta bra litteratur! Tack även till VTI kollegorna Björn Kalman, Gunilla Franzén, Leif G. Wiman och Safwat Said för diskussioner och faktagranskning av texten.

Linköping februari 2009

*Fredrik Hellman*

## Kvalitetsgranskning

Intern peer review har genomförts 2009-02-11 av Safwat Said vid VTI. Fredrik Hellman har genomfört justeringar av slutligt rapportmanus 2009-02-11. Projektledarens närmaste chef, Gunilla Franzén, har därefter granskat och godkänt publikationen för publicering 2009-02-11.

## Quality review

Internal peer review was performed on 11 February 2009 by Safwat Said at VTI. Fredrik Hellman has made alterations to the final manuscript of the report the same day. The research director of the project manager, Gunilla Franzén, examined and approved the report for publication on 11 February 2009.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	5
Summary .....	7
1     Introduktion .....	9
2     Information om titandioxid .....	10
3     Teori Fotokatalysis – Hur fungerar det? .....	11
4     Testmetoder .....	13
4.1   NO <sub>x</sub> -reduktion .....	13
4.2   VOC reduktion .....	13
4.3   Blekning av organisk smuts .....	13
5     Fältstudier .....	14
6     Miljöaspekter .....	15
7     Något för svenska vägar? .....	16
Referenser .....	18



## **Användning av TiO<sub>2</sub> nanopartiklar för fotokatalytisk självrening på vägar – en kort litteraturöversikt**

av Fredrik Hellman  
VTI  
581 95 Linköping

### **Sammanfattning**

Luftkvaliteten i anslutning till hårt trafikerade vägar är ett miljö- och hälsoproblem på många platser. Fotokatalytiska material med nanopartiklar av titandioxid har utvecklats de senaste åren. Många forskningsprojekt med fokus på luftrenande betong har visat att det är möjligt att minska mängden NO<sub>x</sub>-gas och VOC (volatile organic compounds) i förorenad luft i anslutning till ytor med titandioxid. Luften är renad enbart genom bestrålning med UV-ljus (solljus) av de fotokatalytiskt aktiva ytorna.

Denna översiktliga litteraturstudie fokuserar på att ge information om hur fotokatalytisk självrening med nanopartiklar av titandioxid fungerar och hur den kan användas i vägkonstruktioner. Rapporten ger en allmän beskrivning av titandioxid och dess användningsområden. Den beskriver översiktligt några vanliga analysmetoder för att mäta den självrenande effekten (NO<sub>x</sub> reduktion och nedbrytning av VOC). Några fältexperiment beskrivs där man använt tekniken och de uppnådda effekterna redovisas.





## **Use of TiO<sub>2</sub> nanoparticles for self cleaning of roads – A short literature survey**

by Fredrik Hellman

VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute)

SE-581 95 Linköping Sweden

### **Summary**

Air quality in connection to streets with heavy traffic is a problem that affects the environment and people's health at many places. Photo catalytic properties of materials with nano sized TiO<sub>2</sub> have been developed in recent years. Many research projects have focused on air cleaning properties of concrete and cement based materials. It has been shown that it is possible to decrease the amount of NO<sub>x</sub> gases and VOC (volatile organic compounds) in polluted air by using TiO<sub>2</sub> in the products. The air is cleaned only by radiation of the photo catalytic active surfaces with UV-light (sunlight).

This short literature survey aims to give information about how photo catalytic self cleaning works with nano sized TiO<sub>2</sub> and how it can be used in road constructions. The report gives a general description about TiO<sub>2</sub> and its field of use. It will also provide a review of some commonly used analyse methods to measure the self cleaning effect. The results of a few field experiments are also reported.



## 1 Introduktion

Luftkvalitén i anslutning till hårt trafikerade vägar är ett miljö- och hälsoproblem. Speciellt dålig kan luften vara i tunnlar, parkeringshus och vid stillastående trafik vid t.ex. trafikljus i stadsmiljö. Om vägar och andra byggnadsverk skulle kunna omvandla en del av avgaserna (t.ex.  $\text{NO}_x$  gaser) som trafiken släpper ut, skulle luftkvalitén i dessa miljöer förbättras.

Denna översiktliga litteraturstudie fokuserar på att ge information om hur denna teknik fungerar och hur fotokatalytisk titandioxid kan användas i vägkonstruktioner. Förhoppningsvis kan denna studie även inspirera till fördjupad kunskap och kanske bidra till ett ökat intresse att utveckla vägteknik i Sverige som aktivt kan minska utsläpp från biltrafik.

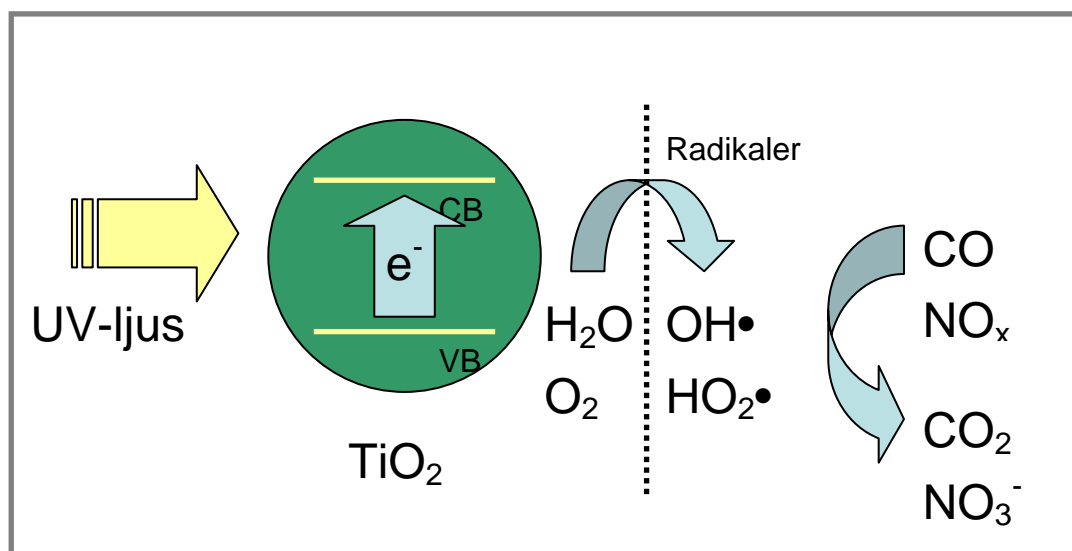
## 2 Information om titandioxid

Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) används ofta som ett vitt färgpigment i t.ex. färg, plast, betong och många andra produkter. Det förekommer även som pigment i färgad asfalt (Andersson m fl., 2006). En viktig anledning till att det fungerar bra som vitt pigment är dess mycket höga brytningsindex (Blöß och Elfenthal, 2007). Det är dessutom en relativt ofarlig kemikalie för människor. Kemikalieinspektionen påpekar dock att det kan finnas risker med användandet av nanopartiklar i allmänhet och att det idag inte finns några bra metoder att undersöka riskerna med nanomaterial (läs mer i Kemikalieinspektionens rapport nr 6-07).

Titandioxid har den speciella egenskapen att den ger fotokatalytiska effekter till det material som den används i. Den fotokatalytiska effekten blir störst om titandioxiden är av nanostorlek dvs. 1–100 nanometer. Två av pionjärerna på fotokatalys är Fujishima and Honda (1972) som beskriver den grundläggande teorin, den s.k. Honda-Fujishima effekten; (Fujishima m.fl., 1999). Den fotokatalytiska effekten uppstår genom bestrålning med UV-ljus. Effekten kan bestå av nedbrytning av organiska föreningar och material som kontaminerar en yta. Ytan hålls på detta vis ren utan mekanisk rengöring eller kemikalier. I kombination av vissa metaller blir ytan dessutom antibakteriell. Ytan får också en fotoinducerad hydrofobisk (vattenavstötande) egenskap som gör att smuts inte fastnar och att t.ex. en glasyta inte immar igen (inga vattendroppar bildas). Vidare har  $\text{TiO}_2$  egenskapen att den kan katalysera oxidationen av  $\text{NO}_x$  och VOC (volatile organic compounds) i förorenad luft. Denna egenskap används inom färg-, betong- och cementvaruindustrin för att skapa produkter som ger en bättre luftkvalitet både utomhus och inomhus.

### 3 Teori Fotokatalysis – Hur fungerar det?

Det som ger titandioxidens ( $\text{TiO}_2$ ) fotokatalytisk effekt är dess förmåga att absorbera UV-strålning (Figur 1). När UV-strålningen absorberas kommer elektroner ( $e^-$ ) exciteras ur sin normala elektronbana (VB – Valence band) till en annan (CB – Conduction band). På så sätt skapas ett elektronhål som drivs mot  $\text{TiO}_2$  kristallernas yta. Vid ytan kan syre ( $\text{O}_2$ ) och vattenmolekyler ( $\text{H}_2\text{O}$ ) som absorberats transformeras till radikaler. Dessa radikaler är mycket reaktiva och kan reagera med organiska föreningar och oxidera inorganiska molekyler som t.ex. kväveoxider ( $\text{NO}_x$ ) och kolmonoxider ( $\text{CO}$ ) till dess högsta oxidations tillstånd dvs.  $\text{CO}_2$  resp.  $\text{NO}_3^-$ . Ovanstående kemiska förklaring är förenklad efter Blöb och Elfenthal, (2007).



Figur 1 Bilden visar teoretisk funktion av fotokatalys med  $\text{TiO}_2$ , modifierad efter Blöb och Elfenthal, (2007).

Det som påverkar hur fotokatalytiskt aktiv titandioxiden är är främst dess kristallstruktur och kristallstorlek. Hög specifik yta ger en större fotokatalytisk effekt. För att få en hög specifik yta används mycket små kristaller i nanostorlek, 1–100 nm. Kristallin  $\text{TiO}_2$  tillhör Rutil Gruppen och finns i tre polymorfa kristallstrukturer, Anatas, Rutil, och Brookit. Generellt är lågtemperaturformen Anatas den mest fotoaktiva av de tre polymorferna (Bianch m.fl., 2007). En kommersiellt fotoaktiv  $\text{TiO}_2$  ofta använd produkt som t.ex. Degusta P25 består av 80 % Anatas och 20 % Rutil (Hurum m.fl., 2003). Experiment (Bianch m.fl., 2007) visar att ren Anatas med de minsta kristallstorlekarna ger bäst nedbrytning av organiska lösningsmedlet Toluén under bestrålning av UV ljus dvs. högst fotokatalytisk effekt.

Även luftfuktighet har effekt, Bianch m.fl., 2007, visar att en högre luftfuktighet ger en effektivare fotokatalytisk effekt för nedbrytning av toluén jämfört med en helt torr atmosfär. Motsatt effekt visade Beeldens (2007) för nedbrytning av  $\text{NO}_x$  i en fotokatalytisk cementprodukt. Där ökade nedbrytningen av  $\text{NO}_x$  markant när relativa fuktigheten minskade från 70 % till 30 %. Den optimala luftfuktigheten kan uppenbarligen variera mellan olika produkter.

Den fotokatalytiska effekten är beroende av att den fotokatalytiskt aktiva ytan bestrålas med UV-ljus i ett visst våglängdsband. Detta beror på att kristallstrukturen hos titandioxiden bara kan absorbera UV-ljus av dessa våglängder. Undersökningar (t.ex. Blöß och Elfenthal, 2007) visar att genom att dopa Anatas kristallstruktur med kol kommer absorptionen av ljus att ske i det synliga ljusets våglängdsband. Detta gör det enklare att använda  $\text{TiO}_2$  i miljöer där det normalt inte finns UV-ljus t.ex. i inomhusmiljö eller vägtunnlar.

## 4 Testmetoder

Det finns flera testmetoder för att undersöka hur effektiv en fotokatalytisk yta är med avseende på nedbrytning av olika föroreningar. En del av de vanliga är listade nedan.

### 4.1 NO<sub>x</sub>-reduktion

Det finns två principiellt olika metoder för att bedöma NO<sub>x</sub>-reducerande egenskaper, en dynamisk och en statisk metod.

En vanlig dynamisk metod är den så kallade "Flow through method". Den finns beskriven i den Japanska standarden JIS TR Z 0018 "Photocatalytic materials – Air purification test procedure". Denna metod är föreslagen till att bli en ISO standard – "Fine ceramics – Test method for air purification performance of photocatalytic material – Part 1: Removal of nitric oxide" ISO TC 206/SC N.

I princip fungerar den så att gas med 1 ppm koncentration av NO blåses med en bestämd hastighet över en provkropp med bestämda dimensioner. Provkroppen är placerad i en speciell provkammare med kontrollerad temperatur och fuktighet och bestrålas genom ett fönster med UV-ljus med 300–460 nm våglängd. Effektiviteten bedöms genom att mäta NO<sub>x</sub> koncentrationen vid utloppet och NO<sub>3</sub><sup>-</sup> koncentrationen i vatten som provet sänks ner i.

Den Italienska standarden UNI 11247 är en statisk metod där provet placeras i en provkammare som fylls med luft med en bestämd NO<sub>x</sub> koncentration. Provet bestrålas genom en glasruta en bestämd tid. Därefter mäts koncentrationen av NO<sub>x</sub>-gaserna och proceduren upprepas några gånger. Efter några cykler får man en kurva som visar hur NO<sub>x</sub>-gasernas koncentration ändras och kan bestämma hur effektivt fotokatalysen fungerar.

Vidare finns många metoder som liknar de ovan beskrivna men som avviker på något sätt t.ex. avseende storlek och utförande av provkammaren.

### 4.2 VOC reduktion

Enligt Cassar m.fl., 2007 går både statisk och dynamiska tillvägagångssätt som liknar de för NO<sub>x</sub> reduktion att använda för även bestämning nedbrytning av VOC.

En statisk metod för undersökning av nedbrytning av VOC i fotokatalytiskt cementmaterial föreslås av PIKADA projektet och Strini m.fl., (2005). De använder en 2 liters glaskammare där så kallade BETEX (benzene, etylenbenzene, toluene och o-xylene) kolväten tillförs luften i provkammaren. Provet placeras i provkammaren där det bestrålas. Gasens innehåll av BETEX analyseras efter viss tid i en gaskromatograf. En av slutsatserna av PIKADA projektet är att fotokatalytiska ytor bryter ner kolväteföreningar och att nedbrytningshastigheten är linjär med bestrålningstiden och beror av typen av organisk förening.

### 4.3 Blekning av organisk smuts

PIKADA projektet har tagit fram en test som prövar hur effektivt den fotokatalytiska ytan bleker organisk smuts. Testet går ut på att provkroppen färgas med ett organiskt färgämne (rhodamine). Provet exponeras för UV strålning. En färgmätare mäter hur snabbt provet bleks till ursprungsfärgen.

## 5 Fältstudier

I laboratoriet kan man kontrollera alla påverkande faktorer på ett mycket noggrant sätt. I fältförsök finns fler faktorer som påverkar resultaten. Funktionen måste finnas även i verkliga livet. Det är därför fältförsök är så viktiga.

I PIKADA-projektet har man byggt upp en simulerad stadsmiljö med containrar. Vissa av containrarna är målade i fotokatalytisk ( $\text{TiO}_2$ ) aktiv färg. Luften förorenas av en motor och leds i ett rörsystem utmed sidorna. Sensorer sitter sedan utmed väggarna där  $\text{NO}_x$  och ozon mäts. Resultatet visar att de  $\text{TiO}_2$  belagda ytorna minskade  $\text{NO}_x$  mängden i luften med 40–80% jämfört med en referensyta utan  $\text{TiO}_2$ .

Ett annat experiment i PIKADA-projektet testade en fotokatalytisk färg i ett parkeringshus under jord. Ljuset kompletterades med UV lampor. Resultatet visar på en minskning av  $\text{NO}$ -koncentrationen med 19 %. Det var dock svårt att uppnå stabila förhållanden så resultaten är något osäkra.

Beeldens (2007, 2008) beskriver ett fältförsök från Antwerpen där en parkeringsgata har belagts med marksten som har  $\text{TiO}_2$  i ytskiktet. Laboratorieförsök visar på en teoretisk minskning av  $\text{NO}_x$  koncentrationen med 40 %. Vid mätningar i fält har en del av gatan som inte belagts med fotokatalytiska markstenar jämförts med en annan del som är fotokatalytiskt aktiv. Resultaten indikerar enligt Beeldens (2007) att de högsta topparna med  $\text{NO}_x$  minskar vid kontinuerlig mätning av  $\text{NO}_x$  över tid. Undersökningen visar också att fältmätningar inte är lätta och resultaten blir ofta komplexa.

Guerini and Peccati (2007) beskriver en undersökning där en yta vid en cementfabrik vid Calusco i Italien belagts med markstenar med fotokatalytisk effekt. Platsmonterade  $\text{NO}_x$  sensorer mäter kontinuerligt koncentrationen vid platsen både före och efter platsättningen. Resultaten visar på en 45–50 % minskning av  $\text{NO}_x$ -halterna i luften efter platsättningen.



## 6 Miljöaspekter

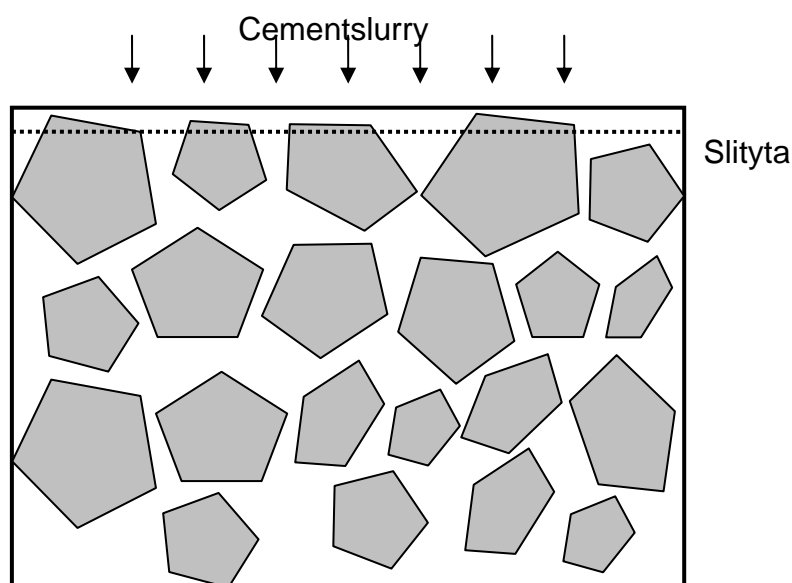
NO<sub>x</sub>-halterna på många platser i våra städer är ofta över gällande gränsvärden. År 2005 trädde nya EU direktiv ikraft som begränsar utsläppen av NO<sub>2</sub> till max 50 µg/m<sup>3</sup> i medel över ett år och max 250 µg/m<sup>3</sup> i medel över en timma. Dessa medelvärden kommer att sänkas ytterligare 2010 till 40 µg/m<sup>3</sup> respektive 200 µg/m<sup>3</sup>. Detta kommer att kräva att utsläppen reduceras på många platser. Ett sätt att minska utsläppen är att använda fotokatalytiskt aktiva ytor på dessa platser.

I betong- och cementvarubranschen har man fokuserat på att utveckla produkter med förmågan att bryta ner NO<sub>x</sub>-föreningar till NO<sub>3</sub><sup>-</sup> utan att de övriga materialegenskaperna ändras. Dessa produkter finns för de flesta typer av ändamål som t.ex. betong för vägar, betongelement, marksten, fasadprodukter, takprodukter, utomhusfärg och inomhusfärg (Cassar, 2004; Crispino and Lambrugo, 2008; Beeldens, 2007; Guerini m.fl., 2007). Förutom den NO<sub>x</sub>-reducerande effekten får man en självrenande yta som behåller sin ursprungliga färg bättre än konventionella cementprodukter (Cassar, 2004).

De flesta studier visar på positiva effekter som nedbrytning och reduktion av luftföroreningar som NO<sub>x</sub>, CO, VOC (volatile organic compounds) samt en självrenande effekt vid användning av fotokatalytiska ytor. Cassar m.fl. (2007) påpekar dock att det även finns negativa effekter. De fotokemiska reaktionerna som bryter ner luftföroreningar som NO<sub>x</sub> och VOC bildar även ozon (O<sub>3</sub>). Ozon är en giftig gas som kan ge andningsrelaterade besvär (Brunekreef, 2003). Höga halter uppstår speciellt i svårt förorenad luft under varma sommark dagar även utan fotokatalytiska ytor. Eftersom föroreningarna ofta är högst vid markytan bildas mest ozon där, man brukar prata om markozon. I vilken omfattning som ozonbildning är ett ökat problem vid användning av fotokatalytiska ytor är inte klart. Man skulle kunna misstänka att ozonbildningen ökar jämfört med ytor som inte är fotokatalytiska. När NO<sub>x</sub> bryts ner bildas NO<sub>3</sub><sup>-</sup> som med vatten bildar salpetersyra. Detta ger upphov till surt regn som försurar sjö och mark långt bort från utsläppskällan. I en fotokatalytisk betong kommer det också att bildas salpetersyra i form av NO<sub>3</sub><sup>-</sup> joner. En betong är alkalisk och kommer att neutralisera syran dvs. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> jonerna fortsätter att reagera med kalciumhydroxid Ca(OH)<sub>2</sub> och bildar ett kristallint kalciumnitrat Ca(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)<sub>2</sub>. Kalciumnitrat är svårslösligt i vatten och ger inte upphov till vidare försurning. Däremot kommer betongen att sakta frätas sönder på ytan. Det är oklart hur snabbt skador på betongen kommer att uppstå. Om de fotokatalytiska ytorna är effektiva och föroreningarna är många kommer det att bildas ganska stora mängder av kalciumnitrat som följer med regnvatten. Därför bör man fundera på att ha någon form av rening av regnvattnet i anslutning till stora ytor med fotokatalytisk effekt. En annan aspekt som inte någon författare tar upp är om ytan kommer att damma och ge upphov till partikelemissioner under torra perioder.

## 7 Något för svenska vägar?

Att använda fotokatalytiskt ( $\text{TiO}_2$ ) material i betong och cementprodukter är inget nytt i Sverige. Flera företag erbjuder produkter med denna effekt. SBUF har också stöttat forskningsprojekt med fokus på fotokatalys i cementprodukter, t.ex. det pågående projektet, 11645 Fotokatalytisk betong – en betong som är självrengörande och samtidigt bryter ned luftföroreningar. De flesta svenska vägar är belagda med asfalt vilket gör att det blir en mycket stor investering att konvertera vägar i större omfattning till betongvägar med fotokatalytisk effekt. Vägar med fotokatalytisk effekt kan därför inte bli en generell beläggning för alla vägar. Nyproduktionen av betongvägar är dessutom i Sverige av tradition mycket liten. Det bästa sättet att utnyttja denna teknik är att satsa på de platser som har mest problem med föroreningar. I princip kan alla ytor som husfasader, väggar, trottoarer, kantstenar, hustak och vägyta på en plats med speciellt mycket föroreningar utnyttjas för fotokatalytisk effekt. Grundregeln bör vara att angripa föroreningen så nära källan som möjligt och helst minska på själva utsläppet. Exempel på platser som kan vara aktuella att använda fotokatalytisk teknik på är hårt trafikerade gator i stadsmiljö, i anslutning till trafikljus med stillastående trafik, parkeringshus och tunnlar. Busshållsplatser beläggs ofta med betong. Dessa skulle kunna ha fotokatalytiska egenskaper för att förbättra luften för de väntande passagerarna. Utvecklingen av titandioxid som även är fotokatalytisk i synligt ljus underlättar funktionen av installationer inomhus och under mark t.ex. tunnlar och parkeringshus.



Figur 2 Skissen (modifierad efter Crispino and Labrugo, 2008) visar principen för "open graded asphalt concrete" indränkt med cementbruk i ytskiktet.

Olika typer av vägbeläggningar med fotokatalytisk effekt är möjliga. I litteraturen finns beskrivet flera studier där man använt markstenar och betong med  $\text{TiO}_2$ . En studie (Crispino and Labrugo, 2007 resp. 2008) beskriver en teknik där först ett öppet asfaltslitlager läggs med ett porinnehåll på mer än 20 % efter kompaktering (Figur 2). Därefter hålls ett speciellt designat cementbruk med mycket bra flytegenskaper över asfaltsytan. Cementbruket penetrerar in i porsystemet på asfalten. Enligt Crispino and Labrugo (2007, 2008 och referenser däri) får man en beläggning som funktions- och

beständighetsmässigt är fullt jämförbar med traditionella asfaltbeläggningar. En fördel med denna beläggningstyp är att det är enklare att konvertera en befintlig asfaltsväg till denna typ än att gjuta en ny betongväg. Det är möjligt att just denna typ av beläggning kan vara lämplig för svenska förhållanden.

Om fotokatalytiska vägar ska bli verklighet i Sverige måste man satsa forskningspengar på att utveckla användbara koncept som passar svenska förhållanden. I ett sådant projekt bör såväl beställare av vägar samt entreprenörer delta. Det måste även finnas en vilja och acceptans från beslutshavare och allmänhet. Det får man genom att systematiskt undersöka olika koncept och använda tekniken på några utvalda platser som gör det möjligt att utvärdera resultaten.

## Referenser

- Andersson, A., Jacobsson T. och Persson, B-O. 2006. Tillsatsmedel i asfaltpåverkan på arbetsmiljö och omgivning. Slutrapport SBUF projekt 11575, Tillsatsmedel i asfaltmassor, 1–26.
- Beeldens, A. 2008. Air purification by pavement blocks: NO<sub>x</sub> reduction by pavement blocks. NR2C New Road Construction Concepts, april 2008 part 10.2. 101–107.
- Beeldens, A. 2007. Air purification by road materials: Results of the test project in Antwerpen. International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials 8–9 October 2007, Florence, Italy. 187–194.
- Bianchi, C.L., Ardizzone, S., Cappelletti, G., Pirola, C., and Ragaini, V. 2007. The role of the synthetic procedure of nano-crystalline TiO<sub>2</sub> on the photodegradation of toluene. International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials 8–9 October 2007, Florence, Italy. 17–24.
- Blöß, S. and Elfenthal, L. 2007. Doped Titanium dioxide as a photocatalyst for UV and visible light. International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials 8–9 October 2007, Florence, Italy. 31–38.
- Brunekreef, B. 2003. Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. Report on a WHO Working Group. Bonn, Germany. 13–15 January 2003. EUR/03/5042688. 1–92.
- Cassar, L. 2004. Photocatalysis of cementitious materials: Clean buildings and clear air, MRS Bulletin, may 2004, 4pp.
- Cassar, L., Beeldens, A., Pimperl, N. and Gurrini, L.G. 2007. Photocatalysis of cementitious materials, International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials 8–9 October 2007, Florence, Italy. 131–145.
- Crispino, M. and Lambrugo, S. 2007. An experimental characterization of a photocatalytic mortar for road bituminous pavements. International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials 8–9 October 2007, Florence, Italy. 211–226.
- Crispino, M. and Lambrugo, S. 2008. Effectiveness of photo-catalytic wearing course through experimental analyses. ISAP 2008. 94–104.
- Fujishima, A. and Honda, K. 1972. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. Nature 238. 37–38.
- Fujishima, A., Hashimoto, K., Watanabe, T. (1999); TiO<sub>2</sub>, photocatalysis, fundamentals and applications', BKC, Inc., pp. 176.
- Guerini, G., Peccati, E. 2007. Photocatalytic cementitious roads for depollution. International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and Construction Materials 8–9 October 2007, Florence, Italy. 179–186.
- Hurum, D., Agrios, A.A., Gray, K.A., Rajh, T., and Thurnauer, M.C. 2003. Explaining the enhanced photocatalytic activity of Degussa P25 Mixed phase TiO<sub>2</sub> using EPR. J. Phys. Chem. B. 107 4545–4549.
- Kemikalieinspektionen. 2007 Nanoteknik – stora risker med små partiklar? En kunskapssammanställning om risker med nanoteknik för hälsa och miljö, samt förslag till hur identifierade kunskapsluckor bör åtgärdas nedladdningsbar på [www.kemi.se](http://www.kemi.se), nr 6-07. 1–72.

Plassais, A. and Guillot, L. 2006. De-polluting assessment of photo catalytic cement-based materials: from laboratory to real scale testing 10<sup>th</sup> int. symposium on Concrete roads. Brussels/Belgium, 18–22 september 2006. 16 pp

<http://www.picada-project.com/>

Strini, A., Cassese, S. and Schiavi, L. 2005. Measurement of benzene, toluene, ethylbenzene and o-xylene gas phase photodegradation by titanium dioxide dispersed in cementitious materials using a mixed flow reactor. *Applied Catalysis b* 61. 2005. 90–97.

Vallee, F., Ruot, B., Bonafous, L., Guillot, Pimpinelli, N., Cassar, L. 2004. Cementitious materials for self cleaning and depolluting façade surfaces. RILEM International symposium on Environment Conscious Materials and systems for sustainable Development (ECM2004) Koriyama 6–7 sept 2004. 345–354.





VTI är ett oberoende och internationellt framstående forskningsinstitut som arbetar med forskning och utveckling inom transportsektorn. Vi arbetar med samtliga trafikslag och kärnkompetensen finns inom områdena säkerhet, ekonomi, miljö, trafik- och transportanalys, beteende och samspel mellan människa-fordon-transportsystem samt inom vägkonstruktion, drift och underhåll. VTI är världsledande inom ett flertal områden, till exempel simulatorteknik. VTI har tjänster som sträcker sig från förstudier, oberoende kvalificerade utredningar och expertutlåtanden till projektledning samt forskning och utveckling. Vår tekniska utrustning består bland annat av körsimulatorer för väg- och järnvägstrafik, väglaboratorium, däckprovsningsanläggning, krockbanor och mycket mer. Vi kan även erbjuda ett brett utbud av kurser och seminarier inom transportområdet.

VTI is an independent, internationally outstanding research institute which is engaged on research and development in the transport sector. Our work covers all modes, and our core competence is in the fields of safety, economy, environment, traffic and transport analysis, behaviour and the man-vehicle-transport system interaction, and in road design, operation and maintenance. VTI is a world leader in several areas, for instance in simulator technology. VTI provides services ranging from preliminary studies, highlevel independent investigations and expert statements to project management, research and development. Our technical equipment includes driving simulators for road and rail traffic, a road laboratory, a tyre testing facility, crash tracks and a lot more. We can also offer a broad selection of courses and seminars in the field of transport.



HUVUDKONTOR/HEAD OFFICE

LINKÖPING

POST/MAIL SE-581 95 LINKÖPING

TEL +46 (0)13 20 40 00

www.vti.se

BORLÄNGE

POST/MAIL BOX 760

SE-781 27 BORLÄNGE

TEL +46 (0)243 446 860

STOCKHOLM

POST/MAIL BOX 55685

SE-102 15 STOCKHOLM

TEL +46 (0)8 555 770 20

GÖTEBORG

POST/MAIL BOX 8077

SE-402 78 GÖTEBORG

TEL +46 (0)31 750 26 00