

HÅLLBARA BETONGVÄGAR – UNDERHÅLL (ETAPP I)

**TRAFIKVERKET****vti****SKANSKA****CEMENTA**
HEIDELBERGCEMENT Group**RI
SE****Författare:****Roger Nilsson, Skanska Sverige AB, Teknik****Iad Saleh, NCC Sverige AB, Teknik****Mats Gustafsson, VTI****2022-11-07****SBUF stödjer**
forskning & utveckling**som leder till**
praktisk handling

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

INNEHÅLLSFÖRTECKNING.....	1
SAMMANFATTNING	2
A: ERFARENHETER SVENSKA BETONGVÄGAR	2
B: RECEPTFRAMTAGNING.....	2
C: MATERIALTESTER KTH	2
D: FULLSKALETESTER I VTI:S PROVVÄGSMASKIN	3
E: UNDERHÅLL AV BETONGVÄGAR	3
F: LCC AV FRAMTAGNA BETONGRECEPT	4
FÖRORD.....	6
INLEDNING.....	7
BAKGRUND.....	7
MÅL OCH SYFTE	8
METOD OCH GENOMFÖRANDE	8
DISKUSSION OCH FÖRSLAG TILL FORTSATTA STUDIER	10
BILAGA A: HISTORIK SVENSKA BETONGVÄGAR.....	10
BILAGA B: UTVECKLING AV HÅLLBAR OCH SLITSTARK BETONG TILL BETONGVÄGAR.....	10
BILAGA C: MATERIALTESTER KTH	10
BILAGA D: FULLSKALETESTER I VTI:S PROVVÄGSMASKIN.....	10
BILAGA E: UNDERHÅLL OCH REPARATIONSMETODER.....	10
BILAGA F: LCA AV FRAMTAGNA RECEPT	10

SAMMANFATTNING

A: Erfarenheter Svenska Betongvägar

I ett historiskt perspektiv har betongvägar fram till 1990-talet uppvisat relativt bra funktionalitet och livslängd. Det tidigare betongvägarna utfördes möjligtvis med större omsorg och med högkvalitativa material anpassade för rådande förhållanden. Eftersom få betongvägar byggts i Sverige, och då främst av utländska entreprenörer, har inhemsk kunskap inte utvecklats och till viss del gått förlorad. Avsaknad på betongvägsprojekt har också lett till att det inte finns någon glidformsläggare/utrustning i Sverige. Ytterligare en orsak kan härledas till medvetna kostnadsbesparingar vilket bland annat resulterat att material eller blandningar med lägre kvalitet /krav använts vilket medfört reducerad livslängd. Vidare kan skillnaden bero på introduktion och ökat användande av dubbdäck från 60-talet samt fler och tyngre fordon. En reflektion är att tjockleken på betonglagret har minskat samtidigt som den tunga trafiken både har ökat i antal och maxvikt.

B: Receptframtagning

Projektets receptgrupp valde ut sex kandidatrecept och ett referensrecept för fullskaletester i provvägsmaskin (PVM) baserade på hållfasthet och Prall. Följande recept valdes:

- 5C: Ett recept med bra Prall, utan silika och relativt högt vct.
- 7A: Referens med dåligt kulkvarnsvärde.
- 4H-2L: Ballast från Hovgården med luft och silika. Alternativ till Torphyttan. Bästa resultatet från Hovgården.
- 5H-2L: Ett av de bästa recepten med avseende på Prall.
- 5F-3L: Bra Prall-värden (<20) med mycket lågt vct och silika, samt stenmjöl.
- 5F-4L: Bästa resultatet med avseende på Prall, mindre partikelsprång med stenmjöl samt moderat cementhalt.
- 5O: Amerikanskt recept med ok Prallvärde och relativt god arbetbarhet. Så få partikelsprång som möjligt, ingen silika och relativt låg cementhalt.

C: Materialtester KTH

Resultaten visar att betongvägmaterialet med hårdast ballast visade en signifikant lägre nötning i dom båda provmetoderna (pinne-på-skiva och pendel) som använde dubbdäck som motyta. Fler variabler såsom total ballastvolym, Dmax och vct, påverkar också betongvägmaterialets nötning. För de övriga två provmetoderna var rankningen av betongvägmaterialets nötning motsatt mot de som erhöles med pinne-på-skiva och pendel.

Resultaten visar att ett av betongvägmaterialet (med ballast från Torphyttan) uppvisar en signifikant lägre nötning i form av bortnött massa och även ett signifikant lägre antal genererade luftburna partiklar. Detta vägmateriel var det material som redovisade hårdast ballast. En reducering av normallasten mellan dubbdäck och vägmateriel reducerar också i hög grad bortnött massa och antalet luftburna nötningspartiklar. Vid prov med de rena stenmaterialen uppvisas en jämförelsevis stor minskning av antalet luftburna partiklar medan den bortnötta massan var av samma storleksordning som de vägmateriel som hade motsvarande ballasthårdhet som stenmateriallets hårdhet.

D: Fullskaletester i VTI:s provvägsmaskin

Utifrån testerna kan dras slutsatserna att:

- Massa 5F-4H, 5H-2L och 5F-3L är ungefär lika slitstarka och bättre än 4H-2L och 5C, dessutom ännu bättre än 5O och 7A vid torr bana.
- Massa 5F-4H, 5H-2L och 5F-3L är bättre än 4H-2L och 5C, dessutom ännu bättre än 5O och 7A, när det gäller avnötning vid våt bana och även i genomsnitt.
- Massa 5F-3L är dessutom bättre än 5F-4H och 5H-2L när det gäller avnötning vid våt bana.

Resultaten från testerna i PVM visar att slitaget på samtliga beläggningar är 2–2,5 gånger högre under våta förhållanden än under torra.

Korrelationen mellan slitaget och receptens Prallvärden är hög vid torra förhållanden ($R^2=0,74$) och medelhög vid våta ($R^2=0,49$). Det kan noteras att receptet 5F-3L genomgående har lägst slitage trots endast tredje lägsta Prallvärde.

Två material som provats i ett tidigare projekt kunde jämföras med resultaten från föreliggande projekt. Ett av dem hade under våta förhållanden nästan lika lågt slitage som det bästa receptet i föreliggande studie, medan båda hade högre slitage än fem av de sju nya recepten vid torr vägbana.

E: Underhåll av betongvägar

Betongvägarna utförda i Sverige fram till mitten av nittitalet har uppvisat relativt bra funktionalitet och livslängd. De senare betongvägarna har generellt inte uppvisat lika goda egenskaper vilket medfört tidigarelagda underhållsåtgärder. Eftersom underhåll och reparationsåtgärder inte funnits tillgängliga har betongvägar inte varit konkurrenskraftiga trots deras fördelar.

En orsak till detta har berott att de val och optimeringar som gjorts i samband med byggnation av betongvägar mer syftat i att kostnadsoptimera än att se till konstruktionens livslängd.

- De betongvägar som finns i Sverige har haft blandade resultat:
 - Arlanda har visat på mycket liten spårbildning, efter 30 år behövdes ingen åtgärd. I en punkt har kraftig sprickbildning setts vilket beror på dålig undergrund och större trafik än beräknat.
 - Sträckan Fastarp – Heberg uppvisade problem med sprickor, CG. Sprickor har injekterats och hela plattor har bytts ut.
 - Förbifart Falkenberg har efter 20 år uppvisat endast 5mm i nötning men däremot har en del längsgående sprickor uppkommit.
 - Eskilstuna: Beläggningen klarade då inte uppsatta jämnhetskrav i längsled (IRI), bl a pga mycket luftporer. Dessutom var det varierande stenkvalitet och en del problem med bärighet pga för tunt tvärsnitt efter fräsning.
 - Uppsala har haft spårbildning, troligen beroende på otillräcklig slitstyrka på stenmaterialet. Det gäller framför allt i det övre slitagedelen.
- En förutsättning för att erhålla en kostnadseffektiv betongväg med lång livslängd är att följande värderas och hanteras: Erforderlig dimensionering, val av ingående material & sammansättning, rätt utförande samt lämpliga underhålls- och reparationsåtgärder i rätt tid.

- De finns idag god kunskap om hur betongvägar skall dimensioneras (konstruktion och material) samt byggas på ett hållbart sätt.
- Nya utvecklade recept optimerade för betongvägsändamål samt ökad kunskap om ingående material (som till exempel stenmaterialkvalitet) förväntas öka livslängden för nya, moderna betongvägar).
- De finns goda erfarenheter om ett antal drift- och underhållsmetoder internationellt vilka potentiellt skulle kunna vidareutvecklas och optimeras för svenska förhållanden.

Det finns en stor möjlighet att verifiera ovanstående aspekter (dimensionering, materialval och receptur, utförande samt underhåll- och reparationsåtgärder) genom att anlägga och följa upp ett antal provsträckor. Med mildare vintrar minskar användningen av dubbdäck vilket kommer att göra att betongvägar gynnas med mindre slitage och underhåll.

F: LCC av framtagna betongrecept

I Sverige finns det få betongvägar som totalt för närvarande utgör en väglängd på 68 km. Då det finns lite erfarenhet samlad är det en utmaning att relatera till de nationella hållbarhetsmålen och de transportpolitiska målen. Det behövs fler exempel som visar hur man kan bygga hållbart och kostnadseffektivt. För att göra det behöver man relatera kvalitetsdata från betongvägar till kostnader i ett livscykelperspektiv. I föreliggande studie föreslås det en metod som använder livscykelkostnadsanalys (LCCA) tillsammans med laboratorie- och fältdata på nötningsmotstånd. Syftet är att identifiera betongrecept för slitlager som ger de lägsta kostnaderna vid investering och över tid.

Sex olika recept har tagits fram i projektet med syfte att ge slitlagret en så god teknisk prestanda som möjligt. Dessa recept har utvärderats med hjälp av en livscykelkostnadsanalys baserad på nuvärdesmetoden och ASEK. De ekonomiska poster som inkluderades i en primär analys är väghållarkostnad och vägarbetskostnad. Sekundärt jämfördes kostnaderna mot en asfaltsväg där även bränslebesparing togs med i kalkylen.

Analysen baseras på en fallstudie som har definierats av Trafikverket. Vägen består av tre körfält i två riktningar och är fördelad på en tunneldel (bergskärning) och en ”vanlig” vägdel (lätt bergbank). Överbyggnaden är olika för vägtyperna och består av ett slitlager på mellan 24 och 25 cm. För att inkludera långtidseffekten av val av betongrecept har en regressionsanalys utförts på spårdjup och Prallvärden på de befintliga betongvägarna i Sverige. Således har Prallvärden som har testats på betongrecepten kunnat korreleras till antalet år till underhåll (slipning).

Resultatet visar att kostnaden för betongrecepten per kubikmeter varken korrelerar med cementhalt eller Prallvärde vilket innebär att det finns potential att bygga både beständigt och kostnadseffektivt samt även miljövänligt då cementet är den största utsläppskällan av koldioxid hos betongreceptet.

Vad gäller väghållarkostnader visade det sig att det billigaste betongreceptet ger de lägsta investeringskostnaderna, vilket är förväntat. Medan det näst billigaste receptet, som har det lägsta Prallvärdet, gav lägst underhållskostnader. Totalt för väghållarkostnader ger den billigaste betongen de lägsta kostnaderna. När vägarbetskostnader inkluderas ger receptet med lägst Prallvärde det totalt sett lägsta kostnaderna. Prallvärdet har därför en avgörande roll för betongvägens ekonomiska hållbarhet. Det föreslås att korrelationen mellan tillståndsdata och Prallvärde för att erhålla en statistiskt säkrad tid-till-underhåll studeras vidare i framtida forskningsprojekt.

Tidigare jämförande LCC-studier utfördes på betong- och asfaltsvägar visar oftast att investeringskostnaderna är högre för betongvägen medan det lägre underhållsbehovet ger totalt

sett lägre livscykelkostnader. Den här studien visar att investeringskostnaderna är lika, med fördel för betong, och att underhållsrelaterade kostnader är avsevärt lägre för betongvägen.

Slutligen indikerar LCC-studien för inom projektet framtagna betongrecept för slitlager att det går att bygga både beständiga och ekonomiskt och miljömässigt hållbara betongvägar som dessutom kan utgöra en stor samhällsekonomisk besparing.

FÖRORD

Föreliggande SBUF-rapport (13373) redovisar en syntes av huvudresultaten från avslutat projekt, ”Hållbara betongvägar – Underhåll (Etapp I). Projektet kommer också redovisas i en VTI-rapport xxx.

Betongvägar har använts internationellt med goda resultat. Betong har visserligen högre kostnad initialt med efter ca 10–20 år brukar betongalternativet vara mer kostnadseffektivt beroende på lokala förhållanden. Betong har även hög initial klimatpåverkan men denna kan visa sig vara låg i ett livscykelperspektiv om lång livslängd och färre underhållsåtgärder erfordras för att vidmakthålla vägens egenskaper. I Sverige har betong framför allt använts vid flygplatser och hamnar för att hantera mycket tunga laster. Betong har inte varit framgångsrikt för vägändamål. Ett antal provvägar med betong har testats under de senare åren men förväntade egenskaper och livslängder har inte uppnåtts. Vidare har det saknats kunskap och metoder för reparation och underhåll av betongvägar.

Sverige har bland de högsta tillåtna fordonsvikter i världen. Dessa tunga transporter är bra för konkurrenskraften men ökar behovet av bärkraftiga vägar.

Projektet initierades då det fanns tidiga planer på att använda betongöverbyggnader i tunnlarna i Förbifart Stockholm.

Projektet har finansierats av Svenska Byggbranschens utvecklingsfond (SBUF), Bana Väg för Framtiden (BVFF), Cementa samt industriparterna

Projektet har finansierats av Trafikverket, SBUF, Cementa samt industriparterna.

Projektgruppen vill tacka samtliga för gott samarbete och givande diskussioner och idéer.

Författaren önskar tacka styr- och referensgrupp för deras utvecklande arbete.

Slutligen tackas huvudfinansiärerna SBUF, BVFF och Trafikverket.

INLEDNING

Betongvägar har visat sig vara kostnadseffektiva med lång livslängd i flera länder. Internationella erfarenheter visar på att betongvägar kan trafikeras i över 35 år utan behov av några större reparationsåtgärder. Uppskattade fördelar med betongöverbyggnader är att de är slitstarka och kan bära stora fordonslaster med minimalt underhåll. Betongöverbyggnader används därför ofta där stora laster måste hanteras, tex flygfält, hamnar, högtrafikerade vägar etcetera.

Betongvägar har en normalt högre initial anläggningskostnad men är potentiellt mer kostnadseffektiv redan efter ca 15–30 år men framför allt om hela livslängden beaktas (LCC). Samma gäller klimatpåverkan, dvs hög initial klimatpåverkan (CO₂) men låg påverkan beaktat den långa livslängden samt få underhållsåtgärder räknat över (40–60 år). Vidare medför färre underhållsåtgärder mindre störningar och ökad framkomlighet. Internationellt är därför betongvägar ett bra alternativ beaktat både funktionella egenskaper, kostnadseffektivitet samt miljöaspekter.

För att betongvägar även ska vara ett alternativ i Sverige behöver främst slitageegenskaper samt drift- och underhållsåtgärder vidareutvecklas. Det viktigaste styrande parametrarna för utformning av åtgärder är robusthet, hållbarhet och effektivitet vilket möjliggör ett snabbt slutförande under begränsad tid för att öka framkomlighet för trafikanter.

BAKGRUND

De senaste årens höjning av tillåtna bruttovikter för lastbilar med släp ökar kravet på hållbara vägbeläggningar. Eftersom betongbeläggningar är slitstarka och har hög styvhet är de speciellt lämpliga för vägar med tung trafik. Med ny kunskap skall hållbara och samtidigt miljövänliga betongvägar kunna projekteras inom rimliga materialkostnader för produktion. Betongbeläggningar måste dock liksom asfaltbeläggningar ha förmåga att motstå slitage från dubbdäck. Vidare måste betongvägar klara av höga trafiklaster samt vara anpassade för underhåll när sådant blir aktuellt. Kostnadseffektiva produktions- och underhållsmetoder av betongvägar skall utvecklas utifrån ett LCC-perspektiv. Målet är att utveckla den svenska anläggningsindustrins kompetens för produktion och underhåll av betongvägar.

Anläggningsprojekt inom transportsektorn, såväl nya projekt som renoverings- och upprustningsprojekt, kräver olika typer av lösningar. Den 1 juni 2015 ändrades tillåten bruttomaxvikt för lastbil med släp från 60 till 64 ton. Den 1 maj 2018 ökades ytterligare maxvikten till 74 ton för utvalda delar av vägnätet. Sedan några år är högsta tillåtna bruttovikt 76 ton i Finland, där man redan börjat att observera kraftigt accelererande nedbrytning av vägöverbyggnaderna.

På hårt trafikerade motorvägar för tunga fordon är betong i regel det bästa alternativet för en vägbeläggning, eftersom betongbeläggningars styvhet och hållfasthet medför ett mindre rullmotstånd, lägre bränsleförbrukning, lägre slitage och därmed lägre underhållskostnader och längre livslängd. En fungerande betongbeläggning ger under sin livscykel därför både ekonomiska och miljömässiga fördelar.

Betongbeläggningar utgör ett kompletterande alternativ till andra typer av vägbeläggningar. I ett internationellt perspektiv, saknar Sverige idag praktisk kompetens avseende projektering, produktion och underhåll av betongvägar. Sverige behöver öka kompetensen för projektering av betongväg, både när det gäller produktion och underhåll. Ett fåtal betongvägar har anlagts i Sverige. En del av dessa vägar har uppvisat en hållbarhet motsvarande ställda krav eller bättre, medan däremot andra vägsträckor drabbats av skador och slitage från dubbdäck tidigare och i större utsträckning än förväntat. En viktig aspekt är därför att utveckla och förbättra vägbetong anpassade till nordiska förhållanden med användning av dubbdäck och större tillåtna maxvikter, vilket projektet vill åstadkomma.

Genom att öka kunskapen om betongvägar inom den svenska anläggningsbranschen kan konkurrenskraften i förhållande till utländska aktörer förbättras.

Mål och Syfte

Projektet syftar till att utveckla och utvärdera hållbar betong för användning i betongvägar för att kunna möta efterfrågan på fler och tyngre vägtransporter.

Syftet är vidare att uppfylla robusthet, med mindre underhåll, färre störningar och säkrare vägar. Robusthet gynnar både ekonomi och miljö. Projektet vill även utarbeta kravställning på betongväg, både avseende produktion, funktion, dimensionering och underhåll. Lägre frekvens av underhåll på vägen bidrar också till ökad trafiksäkerhet samt potentiellt lägre livscykelkostnader samt lägre klimatpåverkan, lägre bränsleförbrukning och därmed CO₂-emissioner, mindre hälsoeffekter (minskad partikelemission) samt ökad kunskap om vägbelägningens funktion vilket bidrar till en hållbar infrastruktur.

En mer hållbar infrastruktur bidrar även till främst till att öka urvalet av åtgärder för olika projekt så att de mest optimala åtgärderna i olika projekt kan tas fram i planeringsprocesserna. Genom implementering av kostnadseffektiva produktionsmetoder av betongvägar utifrån ett LCC-perspektiv får man mer nytta för pengarna. Nya innovativa produktionsmetoder kan också komma att studeras, vilket skulle kunna ge en ökning av produktiviteten. Genom att öka kunskapen inom den svenska anläggningsbranschen förbättras konkurrenskraften i förhållande till utländska aktörer.

Metod och Genomförande

Projektet har utförts inom sex olika delprojekt A-F. Varje delprojekt har redovisat resultaten i en delrapport (Bilaga A-F).

Delprojekt A:

I delprojekt A har en sammanställning av svenska erfarenheter utförts. Analys och utvärdering av de svenska betongvägarna har gett information om varför vissa projekt har varit mer framgångsrika än andra. Det har identifierats att materialegenskaper som beaktar slitage samt reparations- och underhållsmetoder är viktiga faktorer för att få betongvägar att fungera för svenska förhållanden.

Delprojekt B:

I delprojekt B har slitstarka och hållbara betongrecept för vägändamål utvecklats. Recepten har utvärderats i labb och utvecklats vidare i en iterativ process. De mest lovande recepten har valts ut för testning i VTI:s provvägsmaskin. Totalt har 28 provplattor tillverkats.

Delprojekt C:

I delprojekt C har en innovativ laborativ metod använts för att utvärdera nötning samt partikelemissioner orsakade av dubb. Både stenmaterial samt olika betongmaterial har provats.

Delprojekt D:

I delprojekt D har de mest lovande betongrecepten testats i VTI:s provvägsmaskin. Denna test är det närmsta man kommer en provsträcka på en riktig väg. Totalt har effekten av 210 000 passager analyserats. Slitage orsakat av dubbdäck har mätts per varje 30 000:e passage. Vidare har slitage utvärderats mot Prall-värde.

Delprojekt E:

I delprojekt D har lovande reparation- och underhållsåtgärder sammanställts och utvärderats. Studiebesök har utförts i olika projekt i England och USA där erfarenheten är stor om reparationsmetoder för underhåll.

Delprojekt F:

I delprojekt F har LCCA på utvalda recept utförts tillsammans med laboratorie- och fältdata på nötningsmotstånd. Syftet är att identifiera betongrecept för slitlager som ger de lägsta kostnaderna vid investering och över tid.

DISKUSSION OCH FÖRSLAG TILL FORTSATTA STUDIER

Resultaten från laboratorie- samt fullskaleförsöken med VTI:s provvägsmaskin visar på att det går att proportionera slitstarka och hållbara recepten för vägändamål. Det förutsätter att material väljs med omsorg för rådande förhållanden (trafik, exponering etc.). Det finns en stor möjlighet att verifiera ovanstående aspekter (dimensionering, materialval och receptur, utförande samt underhåll- och reparationsåtgärder) genom att anlägga och följa upp ett antal provsträckor. Med mildare vintrar minskar användningen av dubbdäck vilket kommer att göra att betongvägar gynnas med mindre slitage och underhåll. Dock bör poleringseffekter beaktas om uppruggningen minskar.

LCC-studien indikerar att för inom projektet framtagna betongrecept för slitlager att det går att bygga både beständiga och ekonomiskt och miljömässigt hållbara betongvägar som dessutom kan utgöra en stor samhällsekonomisk besparing.

En fortsatt studie föreslås för att kunna testa de mest lovande recepten ute i fält. Genom att testa dessa material kan värdefull kunskap och erfarenhet byggas upp för att ytterligare optimera betong för vägändamål. Vidare bidrar provvägar att praktiska produktions aspekter kan utvecklas. Dessutom bör potentiella reparations- och underhållsmetoder utvärderas för svenska förhållanden.

För att ytterligare optimera betongen klimatavtryck bör fortsatta studier utföras med alternativa bindemedel som kan sänka CO₂ med bibehållen funktion.

Slutligen indikerar LCC-studien att för inom projektet framtagna betongrecept för slitlager att det går att bygga både beständiga och ekonomiskt och miljömässigt hållbara betongvägar som dessutom kan utgöra en stor samhällsekonomisk besparing.

BILAGA A: HISTORIK SVENSKA BETONGVÄGAR

BILAGA B: UTVECKLING AV HÅLLBAR OCH SLITSTARK BETONG TILL BETONGVÄGAR

BILAGA C: MATERIALTESTER KTH

BILAGA D: FULLSKALETESTER I VTI:S PROVVÄGSMASKIN

BILAGA E: UNDERHÅLL OCH REPARATIONSMETODER

BILAGA F: LCA AV FRAMTAGNA RECEPT

Bilaga A: Historik svenska Betongvägar

Roger Nilsson, Skanska Sverige AB

Iad Saleh, NCC Sverige AB

Björn Kullander, Trafikverket

2022-03-28

Innehåll

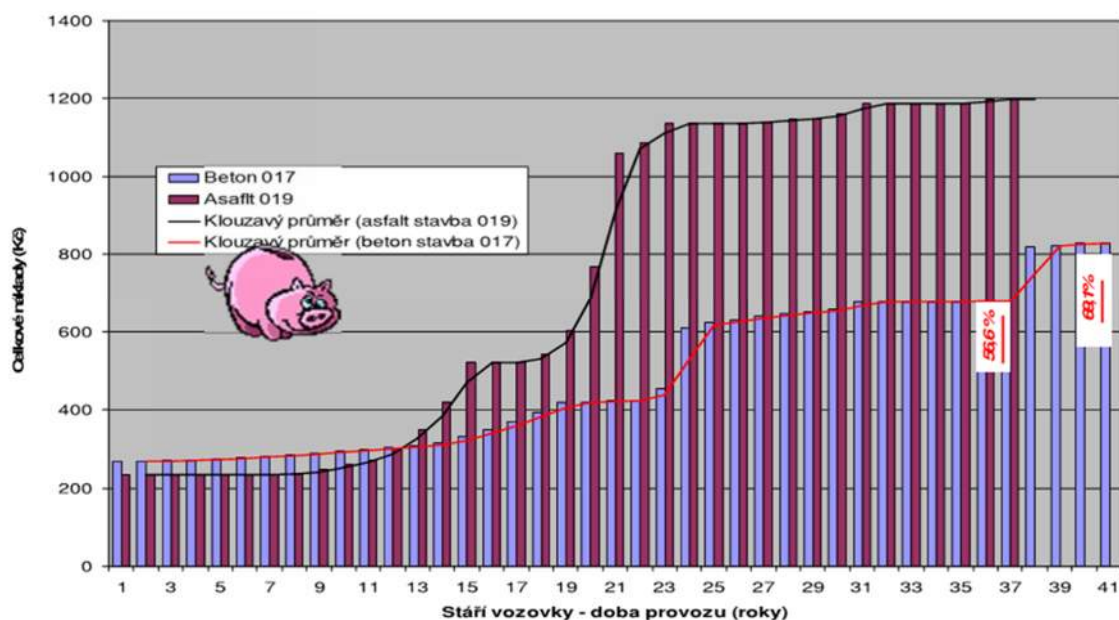
1. Inledning.....	3
1.1. Bakgrund.....	3
1.2. Erfarenheter av betongbeläggningar i Sverige	4
2. Diskussion.....	8
3. Referenser	9

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Betongvägar har visat sig vara kostnadseffektiva med lång livslängd i flera länder. Internationella erfarenheter visar på att betongvägar kan trafikeras i över 35 år utan några större reparationsåtgärder [1]. Uppskattade fördelar med betongöverbyggnader är att de är slitstarka och kan bära stora fordonslaster med minimalt underhåll. Betongöverbyggnader används därför ofta där stora laster måste hanteras, tex flygfält, hamnar, högtrafikerade vägar etcetera.

Betongvägar har en normalt högre initial anläggningskostnad men är potentiellt mer kostnadseffektiv redan efter ca 25–30 år men framför allt om hela livslängden beaktas (LCC). Samma gäller klimatpåverkan, dvs hög initial klimatpåverkan (CO2) men låg påverkan beaktat den långa livslängden samt få underhållsåtgärder räknat över (40–60 år). Vidare medför färre underhållsåtgärder mindre störningar och ökad framkomlighet. Internationellt är därför betongvägar ett bra alternativ beaktat både funktionella egenskaper, kostnadseffektivitet samt miljöaspekter. Figur 1 illustrerar skillnad i totalkostnad mellan en högtrafikerad asfalt- och betongväg i Tjeckien.



Figur 1 Jämförelse av totalkostnad mellan asfalt- samt betongväg i Tjeckien [1].

Betongvägen i Tjeckien är något dyrare initialt men skillnaden minskar efter ca 12 år. Eftersom asfaltvägen kräver mer underhåll ökar kostnaden över åren. Efter ca 37 år är totalkostnaden för betong ca 56,6% av kostnaden för asfaltvägen. Även om denna jämförelse inte direkt kan överföras för svenska förhållanden ger den en indikation om potentiellt lägre livscykelkostnad för betong om en lång livslängd och endast smärre underhållsåtgärder erhålls.

För att betongvägar även ska vara ett alternativ i Sverige behöver främst slitageegenskaper samt drift- och underhållsåtgärder vidareutvecklas. Det viktigaste styrande parametrarna för utformning av åtgärder är robusthet, hållbarhet och effektivitet vilket möjliggör ett snabbt slutförande under begränsad tid för att öka framkomlighet för trafikanter.

Syftet med denna rapport är att kort redogöra för erfarenheter om svenska betongvägar.

1.2. Erfarenheter av betongbeläggningar i Sverige

Syftet med denna rapport är att presentera olika receptkoncept som kan bli aktuella för en betongväg. Målet är att det ska vara ge tips och goda råd inför kommande betongvägsprojekt för att undvika högt slitage och en väg som totalt sett ger en bättre LCC och LCA jämfört med en konventionell väg.

Försök med betongvägar i Sverige har pågått i mer än 100 år [2-7]. Redan år 1906–1907 utfördes viss beläggning med betong på en del gator i Malmö stad. Den första betongbeläggningen på landsväg i Sverige utfördes 1923 på vägen Stockholm-Södertälje, sträckan var blygsamma 400 meter. Den första motorvägen med betongbeläggning invigdes den 8 september 1953 och gick mellan Malmö och Lund. Vägen byggdes genom att gjuta friliggande plattor vilka medförde ett dunkande ljud vid skarvarna mellan plattorna, vilket kan liknas med det ljud som uppstår när tåg kör på gammaldags räls. Vägen invigdes av Prins Bertil som även var den första trafikanten. För att möta ett ökat transportbehov samt bilismens utbredning skedde en snabb utbyggnad av det svenska vägnätet under femtio- och sextiotalet. De låga priserna på olja medförde att asfalt ökade i popularitet. Under oljekrisen på sjuttiotalet ökade intresset för alternativa vägbyggnadsmaterial och några betongvägar utfördes (tex Väla-Hyllinge, E4). I slutet av åttiotalet ökade intresset igen för betong och ett flertal betongvägar byggdes under nittiotalet. Arlandavägen byggdes som ett fullskaleförsök inför planerade E6 sträckor. Högkvalitativt stenmaterial samt högpresterande betong med inblandning av silika nyttjades. Erfarenheterna från fältförsöket användes till stor del vid byggandet av förbifart Falkenberg.



Figur 1 Betongväg vid Arlanda (foto: VTI)

Vid kommande etapp på E6 upphandlades en europeisk entreprenör som implementerade nya produktionsmetoder. Tidigare goda erfarenheter gick delvis förlorad. Bland annat utfördes betongbeläggningen med olika utläggningstekniker (glidformsgjutning, med och utan armering, undermålig dränering mm). Betongvägen på E20 utanför Eskilstuna utfördes också av en utländsk entreprenör. I detta projekt var det initiala problem underkända IRI-värden samt variation av ingående material. Ojämnheterna berodde till stor del av produktionsproblem som resulterade i ojämnt CG-lager. För att åtgärda ojämnheten utfördes en slipning av överytan varvid ca 15 mm frästes bort. Fräsningen åtgärdade ojämnheterna med medförde att överytan hamnade i en del av betongen med stor andel

luftporer [tunnslip]. Dessa partier med hög andel luftporer i betongytan har visat sig reducera nötningsbeständigheten och resultera i ett accelererande spårslitage. Vidare har förtunning av lagertjockleken i sin tur orsakat en kraftig reduktion av bärigheten och förväntad livslängd. Vid några delar av den slipade ytan har bärighetsskador observerats i hjulspår.

Senaste betongvägen som byggts i Sverige är E4 Uppsala-Läby som invigdes 2006. I denna entreprenad utfördes betongvägen på ett lager av asfaltgrus. Vägen utfördes med en modern två lagers glidformsläggare. Det ställdes relativt låga krav på ingående slitageegenskaper (kkv9) för stenmaterial i slitlagret (det övre betonglagret). Vidare blandades stenmaterial med varierande slitageegenskaper som en kostnadsbesparing. Detta har dock bidragit till högre spårslitage än förväntat. Även denna betongväg utfördes av utländska entreprenörer.

Betongvägarna utförda i Sverige fram till mitten av nittitalet har uppvisat relativt bra funktionalitet och livslängd. De senare betongvägarna har generellt inte uppvisat lika goda egenskaper. Orsaken till detta är inte helt klarlagt men kan bero på ett antal faktorer. En förklaring kan vara att de tidigare betongvägarna utfördes med större omsorg samt att material med högre kvalitet användes. Då få betongvägar byggts i Sverige och då främst av utländska entreprenörer har inhemsk kunskap till viss del gått förlorad. Detta har också lett till att det inte finns några större glidformsläggare i Sverige. Ytterligare en orsak kan härledas till upphandling och medvetna kostnadsbesparingar vilket bland annat resulterade i att material med lägre kvalitet använts. Vidare kan skillnaden bero på introduktion och ökat användande av dubbdäck under 60-talet samt fler och tyngre fordon. En reflektion är att tjockleken på betonglagret har minskat samtidigt som den tunga trafiken har blivit tyngre samt ökat i antal.

Det svenska betongvägnätet består idag av motorvägar som är byggda på 1990-talet och 2000-talet:

Tabell 1: Olika vägöverbyggnader i Sverige

	År	Btg [mm]	AG/CG	S-max btg [mm]	Sprickanv. [m]
Arlandavägen (E4:65)	1990	210	CG	18/22	5
Förbifart Falkenberg (E6)	1993	200	CG	16/22	5
Fastarp- Heberg (E6)	1996	200	CG	18/22	5
Eskilstuna- Arphus (E20)	1999	200/185	CG	16/25	5
Uppsala- Läby (E4)	2006	200	AG	16/22	5

Skador som främst observerats på de svenska betongvägarna har bestått i ytskador, spårslitage, sprickor, deformationer samt sättningar. De vanligaste skademekanismerna för de senaste två betongvägarna har varit:

- Dubbdäcksslitage
- Ojämnheter
- Sprickor, både tvärgående och längsgående, hörn, vid dymlingar

Dessa skador har resulterat i oplanerade och tidigare lagda underhålls- och reparationsbehov med omfattande reparationskostnader. Vidare har erfarenhet och kunskap om lämpliga åtgärder/metoder/utrustning för praktiska reparationer av dessa skador varit fragmentariska eller inte funnits tillgängligt.

Reparationen av de svenska betongvägarna har skett på olika sätt men i merparten av fallen har den bestått i fräslåda samt ett slitlager av asfalt. Tunn pågjutning av betong (70 mm) har testats vid E4 Väla-Hyllinge.



Figur 2 Fräslåda (foto: Björn Kullander, Trafikverket)



Figur 3 Tunn pågjutning efter fräsning (foto: Björn Kullander, Trafikverket)



Figur 4 Slutlig yta (foto Björn Kullander, Trafikverket)

I Malmö/Trelleborg har gummiasfalt provats för att lägga över en betongsträcka med förhoppning av att reducera reflektionssprickor. Resultatet gav inte förväntad livslängd. För att åtgärda denna sträcka har betongen avspänts och överlagts med en polymermodifierad asfalt. Resultaten hittills är lovande.

Befintliga betongvägar har i brist på andra underhålls- och reparationsåtgärder ofta lagts över med asfalt, tex Arlandavägen, E18 samt E4). Försök med andra material som cementstabiliserad asfaltbeläggning har utförts på E20. Sektioner med påtaglig sprickbildning har demolerats och ersatts med en helt ny flexibel överbyggnad (tex Arlandavägen).

Andra reparationsmetoder som utförts innefattar demolering och gjutning av nya plattor, sprickinjektering, samt skarvtätning. Resultatet från dessa reparationer har hittills motsvarat

förväntningar. En nackdel med gjutning av nya plattor är att metoden är mycket tidskrävande. Snabbhärdande betong vid mindre gjutningar används utomlands och ger en mycket snabbare reparation och mindre störning. Metoden har resulterat i goda resultat.

En annan potentiell metod som provats utomlands är att ersätta skadade delar av betongen med hela prefabricerade betongplattor vilket kan utföras betydligt snabbare[8]. Försök har även utförts utomlands med mindre betongplattor (ca 1 m²) i olika former för framför allt det lågtrafikerade vägnätet [9].

Betongvägen, Uppsala-Läby (E4) uppvisade större spårslitage än förväntat efter några år. Orsaken till det snabba spårslitage beror till stor del av att krav på stenmaterial i översta lagret var relativt lågt (kkv9), samt att blandning av olika stenmaterial användes som tillsammans uppfyllde krav på mätvärde om kkv9. Det har även observerats lokala sättningar på grund av svag undergrund. Vidare har det varit problem med betongslitlager som utfördes separat på broar. Dessa har lagts över med asfalt.

För att åtgärda betongytan har slipning och fräsning av betongytan utförts. Då det inte gick att slipa tillräckligt djupt blev botten av hjulspåret opåverkat. Valet av avstånd mellan slipskivorna resulterade att planerade bullerreduktion uteblev. Utomlands har det varit en omfattande utveckling av olika sliptekniker som potentiellt kan användas till att åtgärda spårslitage samt öka friktion samt bullerreduktion. För att åtgärda de skadade ytorna har återigen fräslåda samt asfalt valts som reparationsmetod.

2. Diskussion

Det saknas idag en bred kunskap och erfarenhet av långtidseffekter av hållbara och beständiga underhålls- och reparationsåtgärder för svenska förhållanden.

Kortare livslängd än förväntat samt brist på hållbara reparationsåtgärder har bidragit till att betongvägar som alternativ i Sverige har ifrågasatts och inte används i större omfattning. En orsak till detta beror på att Sverige har några andra förutsättningar som hittills inte har beaktats och hanterats fullt ut, som t ex användningen av dubbdäck. Kunskap och erfarenheter om betongvägar samt hur de skall underhållas och repareras har ökat internationellt under de senare åren och i detta kapitel presenteras en sammanställning om hur betongvägar i Sverige kan vidareutvecklas så att mer hållbara underhålls- och reparationsåtgärder erhålls.

Fokus på framkomlighet kräver allt snabbare och effektivare underhåll/reparation som ställer nya krav på betongvägar. Förtillverkade plattor, snabbhärdande betong, slipning, längre livslängd, är potentiellt metoder och effekter som kan vidareutvecklas för att minimera störningar för trafikanter.

3. Referenser

- 1/ Experiences with Concrete pavements, meeting with Ing. Marie Birnbaumová (2013).
- 2/ VTI meddelande 736: Hultqvist, B.-Å. & Carlsson, B. (1994). Underhåll av betongvägar: Diamantslipning av väg E6, delen Malmö-Vellinge. Linköping: Statens Väg- och Transportforskningsinstitut.
- 3/ E4 anslutning Arlanda 1990 (Hultqvist och Carlsson, 1991, 1993, 1998, 2002).
- 4/ E6 Falkenberg del 1, 1993, del 2, 1996 (Hultqvist och Carlsson, 1995, 1993, 1998; Wiman, Carlsson och Hultqvist 2005).
- 5/ E20 Eskilstuna, 1999 (Hultqvist och Carlsson, 2003).
- 6/ CBI Uppdragsrapport: Kalinowski, M. (2011). Betongprover från vägbana E20, Eskilstuna. Stockholm: Cement- och Betonginstitutet.
- 7/ E4 Uppsala, 2006.
- 8/ https://www.researchgate.net/figure/ModieSlab-prefabricated-concrete-pavement_fig3_237818688
- 9/ Precast Concrete Pavements and Results of Accelerated Traffic Load Test, Erwin Kohler, Louw du Plessis, Peter J. Smith, John Harvey, Tom Pyle /(2016).

Bilaga B: Utveckling av hållbar och slitstark betong till betongvägar

Iad Saleh, NCC Sverige AB

Niklas Johansson, Cementsa

Sten Hjelm, Cementsa

Thomas Johansson, Skanska

2021-03-21

Innehåll

1. Inledning.....	3
1.1. Bakgrund	3
1.2. Syfte och mål.....	3
2. Utförande.....	3
2.1. Metodbeskrivning	3
2.2. Provmgångar och stegvis analys av egenskaper.....	7
Labomgång nr 1.....	7
Labomgång nr 2.....	8
Lagomgång nr 3.....	8
Labomgång nr 4.....	8
Labomgång nr 5.....	9
3. Resultat.....	10
4. Diskussion / val för recept för vidare provning i PVM	11
5. Plattorna som tillverkades.....	16
6. Slutsatser	16
7. Bilaga: Samtliga provningar	18

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Detta arbete är genomfört inom ramen för ett SBUF-finansierat projekt som handlar om att utveckla hållbara betongvägar. Sverige har ett fåtal objekt där vägar gjuts med betong, med blandade resultat. Det senaste projektet, E4 Uppsalavägen, har fått mycket kritik för bristande hållbarhet varför Trafikverket bestämt sig för att inte använda betong till kommande Förbifart Stockholm. Det är förstås beklagligt men detta projekt försöker på nytt etablera teknik och metodik för kommande projekt.

1.2. Syfte och mål

Syftet med denna rapport är att presentera olika receptkoncept som kan bli aktuella för en betongväg. Målet är att det ska vara ge tips och goda råd inför kommande betongvägsprojekt för att undvika högt slitage och en väg som totalt sett ger en bättre LCC och LCA jämfört med en konventionell väg.

2. Utförande

Detta kapitel beskriver utvecklingen av framtagande och optimering av hållbar betong för vägändamål.

2.1. Metodbeskrivning

Rent generellt har setts, bland annat från asfaltssidan, att det framför allt är stenens nötningsbeständighet (kulkvarnsvärde, kkv) som bestämmer slitaget – ju mer beständig (lågt kkv) sten desto mindre slitage. Det var också en av de faktorer som var styrande för dimensionering av recept. Andra viktiga faktorer som togs hänsyn till var:

- Mängden sten, där ambitionen i de flesta fall var att ha mer än 50%, helst över 60%. Men mycket sten (krossad ballast) skapar de andra utmaningar i form av sämre arbetbarhet. Vid receptframtagningen var målet att ha ett sättmått <20mm för att betongen ska kunna transporteras med konventionell lastbil och läggas med läggare. Ett lågt sättmått ger också en bra bild över stenmaterialets cementbehov och kompaktering vid vibrering.
- Fördelning av sten: I de första provomgångarna provades mycket sten utan hänsyn tagen till den totala siktkurvan vilket också gav partikelsprång, men i ett senare skede provades även att jämna ut den totala siktkurvan genom att täppa till dessa. Detta är vanligt i en amerikansk metod som kallas tarantellametoden där egenskaperna för stenmaterialet passas in en graderingskurva som påminner om en tarantellaspindel.
- Produktion
 - o Befintliga vanliga material i möjligaste mån med undantag för stenmaterialet (>8mm). Det kan till exempel vara med avseende på tillsatsmedel och på befintliga grusmaterial eller maskinproducerat stenmjöl.
- Inga vct över 0,40 för att säkerställa att de klarar av de tuffaste klasserna med avseende på tösaltning och frost (exponeringsklasser XD3 och XF4).
- Miljö (CO₂). Receptgruppen har även hela tiden haft ett öga på CO₂-avtrycket för receptet i utvecklingen. I detta fall har därför Anläggningscement FA använts som enligt Cementa har ca 20% lägre CO₂-avtryck jämfört med vanliga anläggningscement. Optimeringar har gjorts och cementhalter har sänkts där det är möjligt utan att produktionsvänligheten eller betongegenskaperna blivit lidande i den mån det går. Därtill har även stenmjöl provats då det blir mer vanligt som en delkomponent i betongrecept i olika delar av Sverige.
- Möjlighet att hitta material. Att hitta material lämpliga för betong med ett kulkvarnsvärde <5 eller i närheten valdes ut.

Olika stenmaterial eftersöktes från olika täkter och totalt erhöles 7 olika stenmaterial som hade ett lågt kulkvarnsvärde 4-7:

- Durasplit, 11-16mm
- Hovgården, 11-16mm
- Skutskär, 11-16mm
- Torphyttan, 11-16mm
- Orsa, 11-16mm
- Ryolit, 8-16mm
- Harbo, 11-16mm

En del material, som till exempel Durasplit och Hovgården, har provats i tidigare projekt och som har dokumenterat bra kulkvarnsvärden, togs med även i detta projekt för att få en bra jämförelse.

I möjligaste mån önskades ett kubiserat material men det var inget absolut krav.

Utöver detta användes också en referensmaterial i form av naturmaterial från Enhörna med ett kulkvarnsvärde > 10. Detta för att kunna se en klar relation gällande kulkvarnsvärde och slitage eller Prall.

Gällande ”limmet” i betongen var svårigheten att ”dimensionera” själva cementpastan. Då den ofta är svagare än stenen kan den riskeras bort slitas bort först vilket kan skapa förutsättningar för vidare slitage av beläggningen. Och hur stark ska den vara i så fall? Eller ska ambitionen vara att den ska vara så tät som möjligt, eller till och med både och? Då mekanismen är något oklar så bestämdes det att olika åtgärder ska provas fram:

- Variation i vct (och därmed olika mängder cement).
- Med silikaslurry i olika grad

I en första filtrering (labomgång 1) provades ett referensrecept där endast stenmaterialet byttes ut för att se hur betongen påverkades både med avseende på färsk och härdad betong. Utgångsläget för cementhalt var 390kg men i vissa fall ökades den med 10kg för att kunna erhålla likvärdighet. Det var dock inte tal om någon cementoptimering, vilket skulle sparas till omgång 2. Dessutom var det två olika nivåer för mängden som skulle blandas in – 60% och 65%.

För samtliga betongrecept provades den färska betongen och bedömdes utifrån arbetbarhet och cementåtgång samt försök till bedömning av kompaktering via en så kallad ICT (provning enligt NT Build 427). En ICT-kompakterare används normalt till styva/jordfuktiga betonger (för till exempel stenplattor) och med den uppmättes den skärkraft som krävs för 10 cyklers belastning/kompaktering. Dvs vilken kompaktering som erhöles för en bestämd betongmängd för ett bestämt antal kompakteringscykler.



Figur 1 ICT-kompakterare

Med ICT-testet var tanken få ett numeriskt värde för kompaktering (i viss mån motsvarande omformningstal), och samtidigt få en uppfattning om betongen fortfarande ger bra yta utan separation i form av vätska i det färdiga provet. Syftet var också att göra ett försök till att ge värden på god kompakterbarhet för så pass styv betong inför utläggning i fält.

För den härdade betongen provades tryckhållfasthet, spräckhållfasthet och frostbeständighet, men framför allt Prall som är ett mått på slitage. Då det inte finns några klara samband mellan betongens hållfasthetsegenskaper (som normalt provas) och slitage och för att inte behöva prova alla recept för Prall valdes de ut med högst spräckhållfasthet. Spräckhållfastheten ger ett indirekt värde för draghållfastheten och draghållfastheten borde rimligen ge information om betongens förmåga att motstå krafter som sliter isär kornen från pastan. De recept som hade högst spräckhållfasthet valdes ut för en första Prallprovning (efter 28-35d) vilket tillsammans med den färska betongens egenskaper fick bli vägledande för vidare provning.

Första provomgången gav också svar på vilken nivå som stenhalten ska ligga på, vilken till slut landade på 60%, mer än så upplevdes betongen som "risig" (håller ej ihop, ej smidig) och svårjobbad. Slutligen gjordes en första provning av luftens inverkan på betongens slitage. Luft blandades därför in i två recept för att se hur det påverkade spräckhållfasthet och Prall.

Totalt provades 17 olika blandningar i labomgång 1. Utifrån resultaten valdes sedan 2 stenmaterial/täkter ut för vidare provning i labomgång 2. I denna omgång var tanken att optimera blandningarna med avseende på cementhalt men även följande parametrar varierades:

- Vct: 0,33-0,38 med anpassad cementhalt.
- Med och utan silika
- Högre innehåll av sten (>60%), där det fortfarande ansågs möjligt.
- Naturgrus och stensmjöl, där majoriteten av blandningarna gjordes med naturgrus. Stensmjöl provades för att se om en märkbar skillnad kunde ses i det slutliga Prallvärdet.

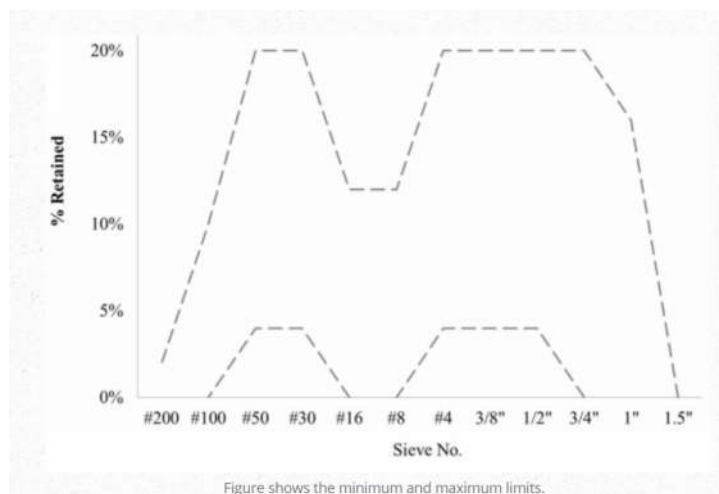
Bedömningen från labomgång 2 gjordes på samma sätt som för labomgång 1 men med skillnaden att Prallproverna gjordes efter en längre tids härdning, 100-105 dagar istället för 28-35 dagar. Totalt gjordes i labomgång 2 totalt 15 blandningar.

I omgång 3 provades recept framtagna på CBI/Rise i ett tidigare SBUF-projekt. Tanken var att jämföra dessa med de framtagna i omgång 1 och 2 för att se om något kunde tas med till vidare provning. I dessa recept användes material med lite filler vilket gjorde att cementåtgången minskade.

I labomgång 4 användes resultaten från labomgång 2 och tanken var att försöka ”pressa” fram ännu högre tryck- och spräckhållfasthet för att se effekten på slitaget genom följande variationer:

- Något mer sten där det ansågs möjligt samt försök även till att täppa igen partikelsprång med mellanfraktioner.
- Lägre vct, 0,33-0,35
- Fler recept med lufttillsättning.
- Med ytterligare silika för att stärka upp cementpastan ytterligare.

I labomgång 5 användes erfarenheter från USA, där dimensioneringen av betongrecepten till betongvägarna baseras på den så kallade tarantellakurvan. Namnet kommer från att siktfördelningen ser ut som en tarantellaspindel (Figur B2), och är utvecklad/framtagen av Dr Tyler Ley vid Oklahoma State University.



Figur 2 Tarantellakurvan av Dr Tyler Ley (<http://www.tarantulacurve.com/>)

Siktkurvan har visat sig mycket framgångsrik i USA för att bygga hållbara betongvägar. De betongvägarna byggs dock för att tåla belastning över tid och inte för att tåla slitage på motsvarande sätt som i Sverige. Förslag på fördelning av stenmaterial erhöles från James Mack, Cemex, USA, tillika medlem i amerikanska betongvägsföreningen.

2.2. Provomgångar och stegvis analys av egenskaper

Labomgång nr 1

Från labomgång 1 valdes 2 material ut som kandidater för fortsatt provning i labomgång 2. Dessa var material från Hovgården och från Torphyttan. Den mest utslagsgivande parametern var slitstyrka uppmätt med Prall, arbetbarhet, cementåtgång (och framtida möjligheter att kunna sänka den), spräckhållfasthet och i mindre mån tryckhållfasthet. Torphyttan valdes framför allt för dessa egenskaper i den färska betongen i kombination med hög spräckhållfasthet.



Figur 3a och 3b packad cylinder från ICT och sättmått för Torphyttan

Bilden på sättmättet blir något missvisande för denna sättmåttsklass då den visar porigheter, varför ICT blev mer vägledande. ”Känslan” som man går vidare med när man utför sättmått blir att antingen är betongen ”mjuk” eller ”stum”. Med andra ord så är sättmättet för detta ändamål ett trubbigt sätt att mäta betongens konsistens/arbetbarhet

För de sämre betongkvaliteterna som varken kändes arbetbara eller kompakterbara för samma cementhalt märktes detta tydligt där en stor del ytorna är fattiga på cementpasta och ingen förbättring sker i ytan med kompaktering, se figur B4a och B4b.



Figurer 4a och 4b Packad cylinder och sättmått för Skutskär

Den andra ballastkandidaten som valdes var Hovgården. Den gav något sämre intryck och värden än Torphyttan men receptgruppen kände ändå att av de övriga fanns det mest potential att jobba vidare med denna. Övriga togs bort då det tidigt ansågs ge för "dålig" betong eller inte upplevdes uppfylla de uppställda kriterierna.

Labomgång nr 2

Baserat på resultat från omgång 1 varierade följande parametrar i omgång 2:

- Vct: 0,33-0,37 (med anpassning av cementhalten)
- Med och utan silika
- Högre nivåer på sten (>60%)
- Naturgrus och stenmjöl
- Med och utan tillsatt luft.

Från denna provomgång bedömdes 2 recept kunna gå vidare för provning i PVM, 4H-2L och 5H-2L. Båda recepten innehöll silika och en lufttillsättning för att kunna klara saltfrost.

Lagomgång nr 3

I omgång 3 provades igen recept framtagna på CBI/Rise i ett tidigare projekt (2019, Moderna betongbeläggningar, M. Gustavssoon, L. Kraft, U. Olofsson). Även om dessa gav en god inblick avseende hur eventuellt cementinnehåll kan minskas genom fillerfattiga material gav de dock inga större förbättringar/skillnader jämfört med recept från omgång 1-2 och de bedömdes vara något svåra att tillämpa på grund av de väldigt snäva fraktionerna som kan vara svåra att uppnå i full produktion. Därför valdes inget av dessa recept för vidare tester i PVM.

Labomgång nr 4

Från labomgång 4 var det 2 recept som valdes ut: 5F-3L och 5F-4L

Recepten valdes baserat på att de gav bäst resultat avseende Prall i kombination med lufttillsättning för att kunna klara saltfrost. Arbetbarheten var bland de sämre men de ansågs ändå att goda slitageegenskaper var viktigare med befintliga material, därav användningen av stenmjöl som kommer att få en än större roll i betongtillverkningen. Labomgång 4 hade även ett recept med baskarpsand och naturgrus men det gav högre slitage och valdes därför bort.

Labomgång nr 5

Labomgång 5 fokuserade mer på erfarenheter från betong till betongvägar i USA, där det utgicks ifrån den s k Tarantellakurvan. Svenska/Europeiska standardmått för siktar skiljer sig från de amerikanska som dessutom använder inches och för att få en någorlunda korrelation erhöles hjälp av en någorlunda översättning. Principen är dock att täppa igen så många partikelsprång som möjligt. En stor skillnad mot USA är att i USA används vct kring 0,45, receptgruppen valde dock att utgå från ett vct kring 0,38 för att uppfylla villkoren för exponeringsklasser XD3/XF4. Det valda receptet hade benämningen 50.

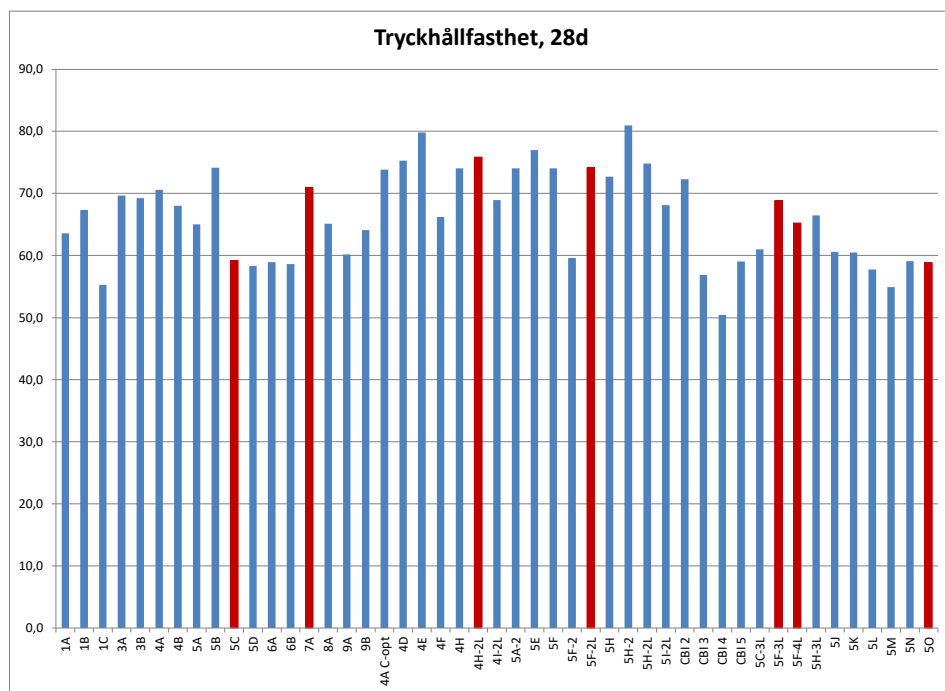
3. Resultat

Totalt bedömdes 6 recept intressanta för vidare provning i provvägsmaskin, det kan sammanfattas i nedan tabell.

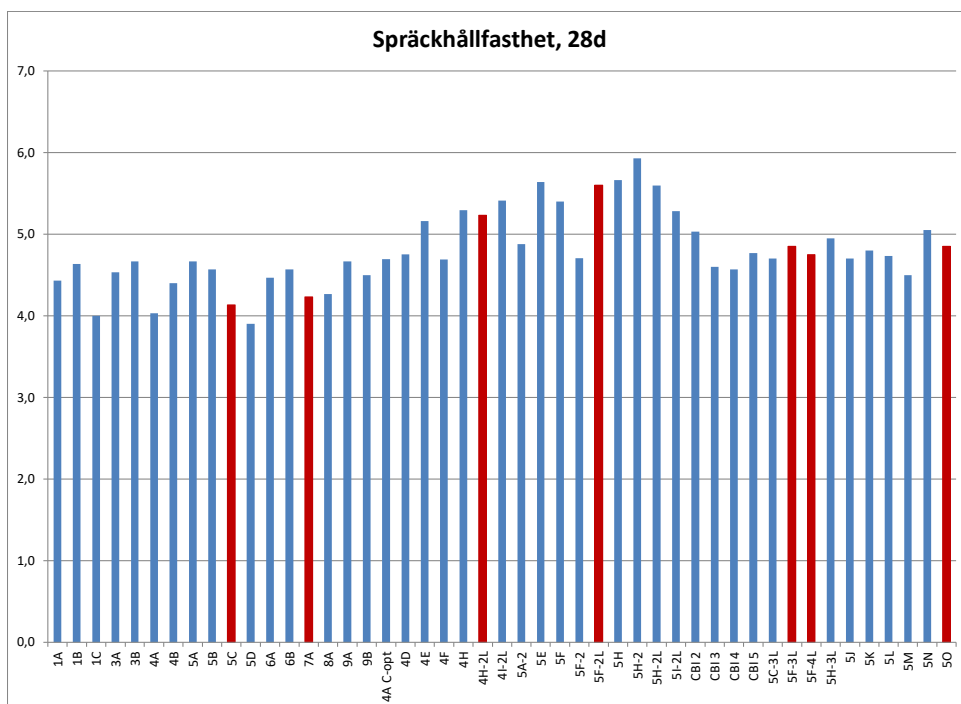
Tabell 1 Utvalda recept för vidare provning

omgång 1			omgång 2			omgång 4			omgång 5	
Blandning nr	9C	7A	Blandning nr	4H-2L	5H-2L	Blandning nr	5F-3L	5F-4L	Blandning nr	5O
Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Enhörna 11-16 ref	Stenmaterial	Hogvården 11-16	Torphyttan 11-16	Tillverkningsdatum	2019 05 20	2019 05 20	Tillverkningsdatum	2019 06 24
ict	0,37	0,37	ict	0,33	0,37	Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Stenmaterial	Torphyttan 11-16
Anl FA	400	400	Anl FA	390	390	ict	0,33	0,35	ict	0,38
Vatten	148	148,0	Vatten	132	132	Anl FA	390	380	Anl FA	360
Flyt Sika RMC 320	0,40%	0,60%	Silika Emsac 500E	15	15	Vatten	136	136	Vatten	137
Luft Micro Air	0,50%	-	Flyt Sika RMC 320	0,90%	0,90%	Silika Emsac 500E	45	15	Flyt Sika Viskocrete 3040 WC	0,20%
Grushalt Riksten 0-8 NK	40%	40%	Luft Micro Air	0,50%	0,50%	Flyt Sika Viskocrete RMC 320	0,30%	0,12%	Luft Micro Air (10%)	0,50%
Stenhalt	60%	60%	Grushalt Riksten 0-8 NK	40%	40%	Luft Micro Air (10%)	0,60%	0,50%	Riksten 0-8 NK	-
			Gladd 0-4 K			Riksten 0-8 NK	-	-	Torphyttan 0-4	40,0%
			Torphyttan 0-4			Baskarp S95	-	-	Jehander 4-8	10,0%
			Stenhalt	60%	60%	Torphyttan 0-4	37,0%	27,0%	Torphyttan 8-11	25,0%
						Jehander 4-8	-	10,0%	Torphyttan 11-16	25,0%
						Torphyttan 11-16	63,0%	63,0%		
Färska egenskaper			Färska egenskaper			Färska egenskaper			Färska egenskaper	
Sättmätt, mm	10	5	Sättmätt, mm	5	10	Sättmätt, mm			Sättmätt, mm	20
Densitet, kg/m ³	2370	2460	Densitet, kg/m ³	2390	2400	Sättmätt, mm	5	5	Densitet, kg/m ³	2410
Lufthalt, %	3,5	2,3	Lufthalt, %	3,2	3,0	Densitet, kg/m ³	2360	2400	Lufthalt, %	3,1
Kompakterbarhet, ICT			Kompakterbarhet, ICT			Lufthalt, %	3,4	2,7	Kompakterbarhet, ICT	-
Skärkraft vid 10 cykler	62	83	Skärkraft vid 10 cykler	51	64	Kompakterbarhet, ICT			Skärkraft vid 10 cykler	-
Kommentar	Lättkompakterad		Kommentar	Fattas pasta	Bra	Skärkraft vid 10 cykler	17	84	Kommentar	
Tryckhållfasthet, 7d			Tryckhållfasthet, 28d			Kommentar	Kladdig	Lite nisig	Tryckhållfasthet, 28d	
1	43,5	53,1	1	75,8	77,6	Tryckhållfasthet, 28d			1	58,1
2	46,1	55,4	2	74,7	75	2	69,8	66,3	2	62,2
3	44,1	54,2	3	77	71,9	3	68,6	62,2	3	56,2
Medel	44,6	54,2	Medel	75,8	74,8	Medel	68,2	67,2	Medel	58,8
Tryckhållfasthet, 28d			Spräckhållfasthet, 28d			Spräckhållfasthet, 28d	68,9	65,2	Spräckhållfasthet, 28d	
1	57,9	71,6	1	5,4	5,4	1	4,5	4,8	1	4,7
2	60,6	71,4	2	5,3	5,5	2	5,2	4,7	2	5
3	59,1	69,7	3	5,1	5,8	Medel	5,2	4,7	3	
Medel	59,2	70,9	Medel	5,2	5,6	Medel	4,9	4,8	Medel	4,9
Spräckhållfasthet, 28d			Tryckhållfasthet, 56d			Prall			Tryckhållfasthet, 56d	
1	4,0	4,4	1	78,4	81,8	1	18,0	16,3	1	
2	4,1	4,2	2	79,5	86,4	2	17,2	16,4	2	
3	4,3	4,1	3	86,1	82,4	3	18,2	18,1	3	
Medel	4,1	4,2	Medel	81,3	83,5	4	22,9	16,9	Medel	
Prall, 28-35d			Prall, 100-105d			Medel	19,1	16,9	Prall	
1	23,9	29	1	23,1	20,3	Frostbeständighet			1	24,6
2	19,5	29,9	2	21,8	17,4	7 cykler	0,00	0,01	2	21,7
3	21,9	31,9	3	22,1	18,5	14 cykler	0,01	0,01	3	23,4
4	18,9	31,4	4	21,1	19,4	28 cykler	0,01	0,02	4	21,3
Medel	21,1	30,6	Medel	22,0	18,9	42 cykler	0,01	0,04	Medel	22,8
Frostbeständighet			Frostbeständighet			56 cykler			Frostbeständighet	
14 cykler	0,01		7 cykler	0,01					7 cykler	0,01
28 cykler	0,01		14 cykler	0,03					14 cykler	0,02
56 cykler	0,01		28 cykler	0,06					28 cykler	
			42 cykler	0,08					42 cykler	
			56 cykler	0,10					56 cykler	

Totalt kan resultaten sammanfattas enligt nedan grafer där de rödmarkerade har valts ut till vidare provning i provvägsmaskin (PVM). Motivering till urvalet i avsnitt 4.

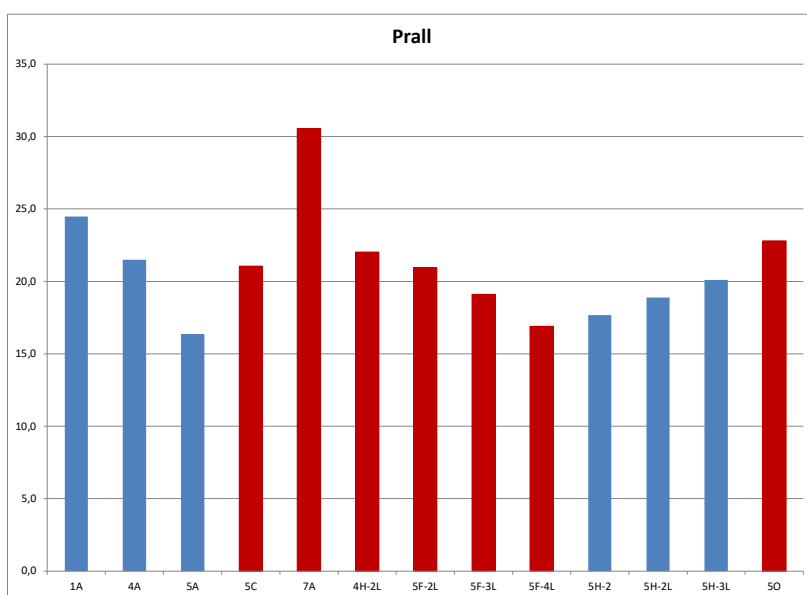


Figur 5 Tryckhållfasthet efter 28 dygn



Figur 6 Spräckhållfasthet efter 28 dygn

I figur B7 nedan presenteras resultatet från de framtagna Prallprovningarna, där lågt Prall-värde är gynnsamt (motivering enligt nedan avsnitt 4 nedan).



Figur 7 Prall-värden för de olika recepten

4. Diskussion / val för recept för vidare provning i PVM

Vid valet av recept till vidare provning i PVM skulle totalt 7 recept provas och för varje recept tillverkades 4 provplattor som placerades i en ring på vilken ett däck rullar på i ett antal varv där sen

slitaget mäts. Med undantag för recept 7A har samtliga recept valts utifrån goda Prall-värden men även saltfrostegenskaper har varit en viktig parameter. Där det har varit någorlunda likvärdigt Prall har i stället urvalskriterierna varit produktionsvänlighet och miljö (cementhalt/CO₂) men även tillsättningar av olika delmaterial för att se hur det slår på slutresultatet. Följande recept med motiveringar valdes:

1. 5C: Ett recept med bra Prall och utan silika och relativt högt vct
2. 4H-2L: Ballast från Hovgården med luft och silika. Alternativ till Torphyttan. Bästa resultatet från Hovgården
3. 5H-2L: ett av de bästa recepten med avseende på Prall
4. 5F-3L: Bra värde (<20) med mycket lågt vct och mkt silika, samt stenmjöl
5. 5F-4L: Bästa resultatet med avseende på Prall, mindre partikelsprång med stenmjöl, moderat cementhalt
6. Referens med dåligt Prall-värde.
7. 5O: Amerikanskt utgångsrecept med bra Prall-värde och relativt god arbetbarhet. Så få partikelsprång som möjligt, ingen silika och låg cementhalt

Urvalet har varit komplicerat då det jämfört med andra betongegenskaper har varit komplext att avgöra hur de olika parametrarna påverkar slitaget på ett positivt eller negativt sätt. Förutom de tekniskt mätbara parametrarna som Prall, tryckhållfasthet och spräckhållfasthet har även urvalet baserats på expertbedömningar av vad som är rimligt att kunna producera så bra och så realistiskt som möjligt med så liten miljöpåverkan som möjligt.

Recept 5C valdes pga dess väldigt låga Prall-värde, dvs bra förmåga att motstå slitage men det fick bli någon form av referens/utgångsläge för ett bra recept med så få tillägg, ändringar, optimeringar som möjligt. Det som kännetecknade 5C var förutom den höga stenandelen var dess mycket goda kompakterbarhet/ arbetbarhet. 5C är också "syster" till recept 5A som hade bl a det bästa Prall-värdet men det var en betong utan luft.

Recept 4H-2L var ett recept med en stenandel på 60% från Hovgården, med ett lägsta vct på 0,33 och med silika. Även om det troligen krävs något mer cement för bättre kompaktering är det ett lovande material och lovande recept med ett lågt Prall-värde på runt 22.

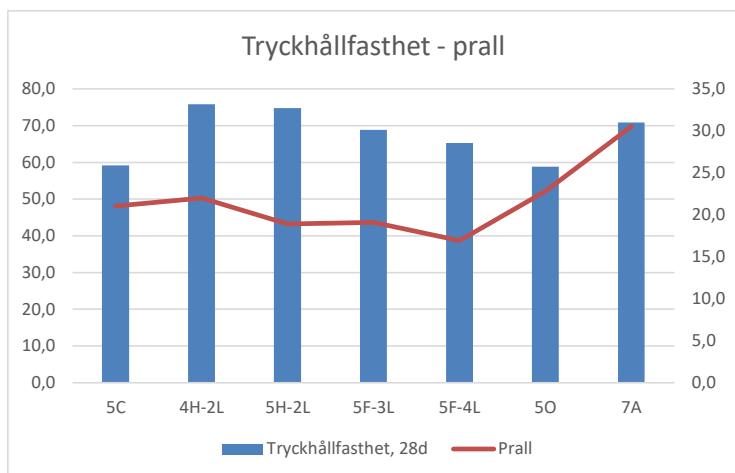
De tre recepten 5H-2L, 5F-3L och 5F-4L är alla med material från Torphyttan med vct 0,33-0,37 och som hade de tre bästa Prallvärdena. 5F-3L och -4L får anses vara mer extrema med helkross och höga stenhalter på runt 63% och cementhalter ej överstigande 390kg vilket får anses bra med tanke på det låga vct-värdet. Troligen får detta justeras upp något för att få en bättre arbetbarhet vid full skala men det bedömdes inte vara mycket.

Att jobba med de amerikanska recepten var däremot väsensskilt med tanke på den lägre stenhalten vilket fick ett enormt negativt genomslag på Prallvärdet. Däremot är det mycket troligt att så få partikelsprång som möjlig är gynnsamt för slitaget (vilket också till viss del sågs i recept 5F-4L) men med facit i hand skulle nog detta gjorts med en stenhalt ej understigande 60% för att få tillräckligt bra Prall-värde.

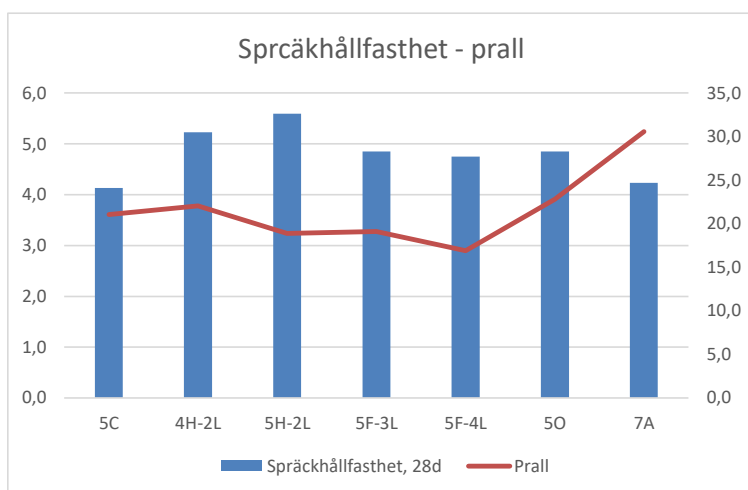
Några kommentarer kan göras kring de olika delmaterialen. Gällande krossmaterial har projektet kunnat visat att bra slitage inte är beroende av runda fina korn utan kross kan mycket väl fungera som ett bra delmaterial i betongmassan. Likt "vanlig" betongreceptframtagning krävs en anpassning av cementpastan efter yta för att få så god kompaktering som möjligt men den är inte beroende av rörelse på samma sätt som för en vanlig betong. Användning av kross har dock varit ett av målen för receptgruppen för att betongen ska få så hög miljöprofil som möjligt för att betongväg ska kunna vara ett bra alternativ till asfalt i framtiden.

Vidare har receptgruppen i detta projekt använt sig av silika för att få en bättre/starkare cementpasta. Man kan fråga sig om det var klokt med tanke på den större närvaron av slagg på marknaden. Det är givetvis en relevant poäng och receptgruppen hade gärna sett att slagg funnits med i receptutvecklingen. Men i detta fall ansågs silika effektivare med den lilla mängd som användes. Det hade dock varit intressant och relevant att ta med slagg och andra möjliga puzzolaner vid en fortsättning.

Gällande de olika sambanden mellan olika parametrar var det svårt att hitta ett entydigt sådant som tydde på att det gav ett högt eller lågt Prall-/slitagevärde. I graferna nedan för tryckhållfasthet respektive spräckhållfasthet i kombination med Prall kan inga direkta samband urskiljas. Möjligen finns tendenser till samband mellan spräckhållfasthet och Prall och det var de tendenserna som var utgångspunkten vid den första filtreringen, från labomgång 1 till labomgång 2 (se även graf i figur B8)



Figur 8 Tryckhållfasthet och Prall för de olika recepten.

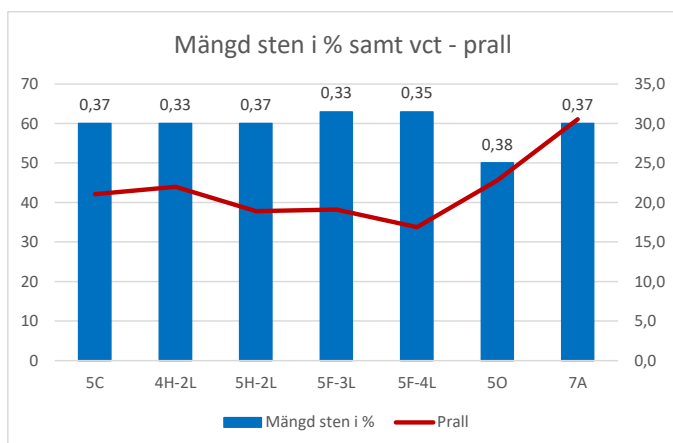


Figur 9 Spräckhållfasthet och Prall för de olika recepten.

De enskilda viktigaste parametrarna för lågt Prall-värde är lågt kulkvarnsvärde i kombination med:

- ”Tillräckligt” lågt vct med tillräcklig mängd pasta
- Högt stenhalt, gärna över 60%
- God vibration

Nedanstående graf visar Prall tillsammans med stenhalt och vct



Figur 10 Stenhalt, vct och Prall. Siffrorna vid staplarna anger vct.

Vad gäller den färskas betongen och resultat från ICT kunde ses en viss relation mellan skärkraften och kompakterbarheten men framför allt bekräftades den känslan när man väl höll på med betongen för hand. Om en betong kunde upplevas "risig" (håller ej ihop, ej smidig) vid mätning av sättmått återspeglades det även i ICT. För de mindre arbetbara betongerna blev skärkraften högre och slutresultatet för den kompakterande cylindern blev också mycket tydlig med håligheter. Nedan foton visar på en jämförelse mellan ett bättre och ett sämre prov i ICT.



Figur 10a Ett prov med god kompakterbarhet i ICT



Figur 10b Ett prov med sämre kompakterbarhet i ICT

En fördel med att använda så pass styva betonger i detta läge var att det gav ett snabbt svar på vilka material som krävde mer energi och mer cement för att erhålla en betong som skulle kunna fungera till vägbetong.

Som jämförelse kan nämnas att i USA används ett s k box-test för att bedöma kompakterbarheten. Den innebär att en låda med speciella mått fylls med betong och en vibratorstav förs långsamt ner och upp under en viss tid. Efter avformning görs en bedömning på ytorna, se figurer nedan.

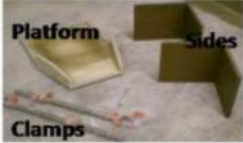
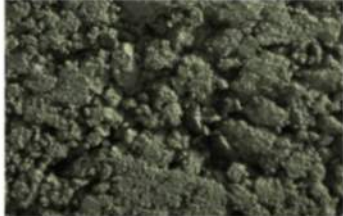
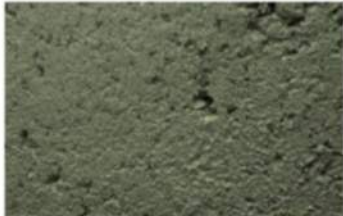
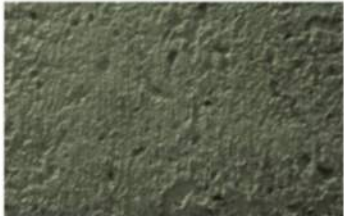
	Step 1	Gather the different components of the Box Test.
	Step 2	Construct box and place clamps tightly around box. Hand scoop mixture into box until the concrete height is 9.5" (241.3 mm).
	Step 3	Insert vibrator downward for 3 seconds and upward for 3 seconds. Remove vibrator.
	Step 4	After removing clamps and the forms, inspect the sides for surface voids and edge slumping.

Table 1. Steps of the Box Test

Figur 11 Utförande av boxtest (<http://www.tarantulacurve.com/>)

	
4	3
Over 50% overall surface voids.	30-50% overall surface voids.
	
2	1
10-30% overall surface voids.	Less than 10% overall surface voids.

Figur 12 Bedömning av ytor enligt boxtest (<http://www.tarantulacurve.com/>)

5. Plattorna som tillverkades

Från de ovan presenterade recepten har ett antal plattor tillverkats för vidare provning i provvägsmaskinen (PVM). De gjordes i en labblandare på Cementas lab i Slite, Gotland.

Efter blandning och gjutning påfördes ytretarder för att nästa dag kunna spola rent ytan från cementskud och sten friläggas. Se bilder nedan.



Figur 13 Tillverkning av betongplattor på Cementa Researchs lab i Slite



Figur 14 Samtliga plattor behandlades med ytretarder så att cementskud tvättades bort och sten kunde friläggas.

6. Slutsatser

- Störst inverkan på slitage hade stenens hårdhet samt mängd.
- Troligen bör mängden sten ej understiga 60%
- Luften hade stor inverkan på slitaget (jämför t ex recept 5A med 5C)
- Tryckhållfastheten hade ingen påverkan på slitage.

- Spräckhållfasthet hade liten påverkan på slitage

7. Bilaga: Samtliga provningar

Labomgång nr 1

Blandning nr	1A	1B	1C	3A	3B	4A	4B
Stenmaterial	Durasplit 11-16	Durasplit 11-16	Durasplit 11-16	Skutskär 11-16	Skutskär 11-16	Hovgården 11-16	Hogården 11-16
vct	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Anl FA	400	390	400	400	390	400	390
Vatten	148,0	144,3	148	148,0	144,3	148,0	144,3
Flyt Sika RMC 320	0,60%	0,70%	0,50%	0,60%	0,70%	0,60%	0,70%
Luft Micro Air	-	-	0,50%	-	-	-	-
Grushalt Riksten 0-8 NK	40%	35%	40%	40%	35%	40%	35%
Stenhalt	60%	65%	60%	60%	65%	60%	65%
Färska egenskaper							
Sättmått, mm	10	10	10	5	5	10	10
Densitet, kg/m3	2430	2470	2410	2430	2430	2410	2430
Lufthalt, %	1,5	1,5	3,6	1,9	1,8	1,8	2,0
Kompakterbarhet, ICT							
Skärkraft vid 10 cykler	58	92	32	57	64	67	83
Kommentar							
Tryckhållfasthet, 7d							
1	45,5	54,2	45,4	50,5	52,2	54,5	53,6
2	54,3	52,2	44	51	57	53,8	56
3	49,8	50,8	44,9	56,3	54,7	53	50,9
Medel	49,9	52,4	44,8	52,6	54,6	53,8	53,5
Tryckhållfasthet, 28d							
1	66,2	70,1	54	64,3	68,7	71,8	64,7
2	64,4	69,3	57,7	71,7	68,7	71,7	72,4
3	60,1	62,7	54,1	73,0	70,4	68,3	67,0
Medel	63,6	67,4	55,3	69,7	69,3	70,6	68,0
Spräckhållfasthet, 28d							
1	4,5	4,6	3,8	4,8	4,8	4,0	4,4
2	4,5	4,7	3,9	4,3	4,8	4,3	4,1
3	4,3	4,6	4,3	4,5	4,4	3,8	4,7
Medel	4,4	4,6	4,0	4,5	4,7	4,0	4,4
Prall, 28-35d							
1	23,9					24,3	
2	26,4					18,9	
3	23,4					23,3	
4	24,2					19,5	
Medel	24,5					21,5	
Frostbeständighet							
14 cykler			0,01				
28 cykler			0,01				
56 cykler			0,02				

Blandning nr	5A	5B	5C	5D	6A	6B	7A
Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Orsa 11-16	Orsa 11-16	Enhörna 11-16 ref
vct	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Anl FA	400	390	400	390	400	390	400
Vatten	148,0	144,3	148	144,3	148,0	144,3	148,0
Flyt Sika RMC 320	0,60%	0,70%	0,40%	0,60%	0,60%	0,70%	0,60%
Luft Micro Air	-	-	0,50%	0,50%	-	-	-
Grushalt Riksten 0-8 NK	40%	35%	40%	35%	40%	35%	40%
Stenhalt	60%	65%	60%	65%	60%	65%	60%
Färska egenskaper							
Sättmått, mm	10	5	10	10	5	1	5
Densitet, kg/m3	2410	2430	2370	2380	2430	2440	2460
Lufthalt, %	2,1	1,6	3,5	3,4	2,0	1,4	2,3
Kompakterbarhet, ICT							
Skärkraft vid 10 cykler	53	79	62	56	91	78	83
Kommentar	Lättkompakterad	Lättkompakterad	Lättkompakterad	Lättkompakterad	Mycket risig	Mycket risig	

Tryckhållfasthet, 7d							
1	53,4	53,3	43,5	46	44,1	47,9	53,1
2	54,5	59	46,1	39,2	41,4	49,5	55,4
3	53,1	58,5	44,1	47	45,1	50,7	54,2
Medel	53,7	56,9	44,6	44,1	43,5	49,4	54,2
Tryckhållfasthet, 28d							
1	71	70	57,9	56,8	61,0	61,7	71,6
2	60,5	76,6	60,6	58,6	58,6	54,4	71,4
3	63,5	75,8	59,1	59,6	57,2	59,8	69,7
Medel	65,0	74,1	59,2	58,3	58,9	58,6	70,9
Spräckhållfasthet, 28d							
1	4,5	4,5	4,0	4,1	4,6	4,5	4,4
2	5,0	4,7	4,1	3,8	4,6	4,6	4,2
3	4,5	4,5	4,3	3,8	4,2	4,6	4,1
Medel	4,7	4,6	4,1	3,9	4,5	4,6	4,2
Prall, 28-35d							
1	16,6		23,9				29
2	15,4		19,5				29,9
3	14,6		21,9				31,9
4	18,9		18,9				31,4
Medel	16,4		21,1				30,6
Frostbeständighet							
14 cykler			0,01				
28 cykler			0,01				
56 cykler			0,01				

Labomgång nr 2

Blandning nr	4A C-opt	4D	4E	4F	4H	4H-2L	4I-2L	5A-2
Stenmaterial	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Torphyttan 11-16
vct	0,37	0,36	0,33	0,37	0,37	0,33	0,33	0,36
Anl FA	390	390	420	390	370	390	390	390
Vatten	144	140	139	144	140	132	131	140,5
Silika Emsac 500E					15	15	15	
Flyt Sika RMC 320	0,70%	0,80%	1,00%	0,80%	0,80%	0,90%	1,10%	0,70%
Luft Micro Air	-	-	-	-	-	0,50%	0,60%	-
Grushalt Riksten 0-8 NK	40%	40%	40%	-	40%	40%		40%
Gladö 0-4 K				40%			38%	
Torphyttan 0-4								
Stenhalt	60%	60%	60%	60%	60%	60%	62%	60%
Färska egenskaper								
Sättnmätt, mm	10	0	5	?	10	5	5	5
Densitet, kg/m3	2400	2400	2410	2400	2420	2390	2390	2420
Lufthalt, %	2,3	2,3	2,3	2,5	2,3	3,2	3,6	1,8
Kompakterbarhet, ICT								
Skärkraft vid 10 cykler	80	79	57	80	51	51	77	71
Kommentar	OK	OK	Svårkompakterad	Känv'seg		Fattas pasta	Svårkompakterad	Ok

Tryckhållfasthet, 28d								
1	73,2	69,3	80,3	67,8	67,5	75,8	69	71,7
2	73,1	79,3	73,4	64,1	76,1	74,7	69,2	75,5
3	75,2	77,2	85,7	66,7	78,6	77	68,7	74,9
Medel	73,8	75,3	79,8	66,2	74,1	75,8	69,0	74,0
Spräckhållfasthet, 28d								
1	4,6	4,6	5,0	4,3	5,4	5,4	5,3	4,8
2	4,7	4,6	5,3	5,0	5,5	5,3	5,6	4,9
3	4,8	5,1	5,1	4,7	5,1	5,1	5,4	4,9
Medel	4,7	4,8	5,2	4,7	5,3	5,2	5,4	4,9
Tryckhållfasthet, 56d								
1	83,2	78,8	90,2	72,5	76,6	78,4	77,3	74,6
2	83,0	83,0	93,6	69,5	86,9	79,5	70,1	80,8
3	72,6	84,7	92,4	73,7	84,8	86,1	74,7	72,1
Medel	72,9	82,2	92,1	71,9	82,8	81,3	74,0	75,8
Prall, 100-105d								
1						23,1		
2						21,8		
3						22,1		
4						21,1		
Medel						22,0		
Frostbeständighet								
7 cykler			0,04			0,01	0,02	
14 cykler			0,09			0,03	0,04	
28 cykler			0,16			0,06	0,06	
42 cykler			0,18			0,08	0,08	
56 cykler			0,22			0,10	0,08	

Blandning nr	5E	5F	5F-2	5F-2L	5H	5H-2	5H-2L
Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16
vct	0,33	0,37	0,37	0,33	0,37	0,35	0,37
Anl FA	420	390	390	390	370	390	390
Vatten	139	144	144	131	140	140	132
Silika Emsac 500E				15	15	15	15
Flyt Sika RMC 320	0,90%	0,80%	0,70%	0,70%	0,80%	0,90%	0,90%
Luft Micro Air	-	-	-	0,60%	-	-	0,50%
Grushalt Riksten 0-8 NK	40%				40%	40%	40%
Gladö 0-4 K			40%				
Torphyttan 0-4		40%		37%			
Stenhalt	60%	60%	65%	63%	60%	60%	60%
Färska egenskaper							
Sättnmätt, mm	5	10	-	-	10	5	10
Densitet, kg/m3	2450	2430	-	2440	2420	2420	2400
Lufthalt, %	-	2,0	-	3,5	2,1	2,2	3,0
Kompakterbarhet, ICT							
Skärkraft vid 10 cykler	67	80	-	-	69	55	64
Kommentar		Kletig men bra		Bra		Bra	Bra

Tryckhållfasthet, 28d							
1	76,9	70,8	57,6	77,1	74,8	82,8	77,6
2	76,6	74,5	60,1	75,2	74,4	80,1	75
3	77,5	76,9	61,1	70,1	68,9	80	71,9
Medel	77,0	74,1	59,6	74,1	72,7	81,0	74,8
Spräckhållfasthet, 28d							
1	5,5	5,3	4,8	5,5		5,8	5,4
2	5,9	5,5	4,6	5,7	5,8	6,1	5,5
3	5,5	5,5	4,6	5,6	5,5	5,9	5,8
Medel	5,6	5,4	4,7	5,6	5,7	5,9	5,6
Tryckhållfasthet, 56d							
1	91,7	85,7	66,4	85,5	80,3	84,6	81,8
2	84,8	85,4	63,4	87,3	84,7	87,7	86,4
3	82,4	83,2	63,9	80,4	77,5	83,0	82,4
Medel	86,3	84,8	64,6	84,4	80,8	85,1	83,5
Prall, 100-105d							
1				21,3		24,2	20,3
2				22,1		16,5	17,4
3				21,1		15,8	18,5
4				19,3		14,2	19,4
Medel				21,0		17,7	18,9
Frostbeständighet							
7 cykler	0,01			0,01	0,01	0,05	
14 cykler	0,07			0,02	0,07	0,06	
28 cykler	0,19			0,04	0,08	0,09	
42 cykler	0,20			0,06	0,10	0,09	
56 cykler	0,22			0,07	0,11	0,10	

Labomgång nr 3

Blandning nr	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5
Tillverkningsdatum	2019 02 04	2019 02 04	2019 02 04	2019 02 21
Stenmaterial	Hovgården 8-11	Hovgården 8-11	Torphyttan 11-16	Hovgården 8-11
vct	0,36	0,36	0,36	0,36
Anl FA	373	373	373	361
Vatten	135,4	135,4	135,4	130
Flyt Sika Viskocrete 3040 W0	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%
Sika Retarder	0,30%	0,30%	0,30%	0,30%
Luft Micro Air	-	0,60%	0,60%	0,30%
Dalboda 0.2-1	29,4%	29,4%	29,4%	29,3%
Hovgården 2-5	10,6%	10,6%	10,6%	10,7%
Stenhalt	60,0%	60,0%	60,0%	60,0%
Färska egenskaper				
Sättnått, mm	5	5	10	5
Densitet, kg/m ³	2400	2310	2340	2370
Lufthalt, %	2,7	4,8	4,8	3,8
Kompakterbarhet, ICT				
Skärkraft vid 10 cykler	88	82	67	84
Kommentar				
Tryckhållfasthet, 7d				
1	56,7	42,6	40,1	42,6
2	56,0	41,7	34,6	41,8
3	57,1	43,4	37,9	46,7
Medel	56,6	42,5	37,5	43,7
Tryckhållfasthet, 28d				
1	69,0	54,6	52,0	59,0
2	74,4	56,2	50,3	60,3
3	73,5	59,8	49,0	57,8
Medel	72,3	56,9	50,4	59,0
Spräckhållfasthet, 7d				
1	4,1	3,8	3,6	3,8
2	4,3	3,8	3,7	-
3	4,2	3,8	3,9	-
Medel	4,2	3,8	3,7	3,8
Spräckhållfasthet, 28d				
1	5,0	4,6	4,8	4,4
2	5,1	4,4	4,5	4,9
3	5,0	4,8	4,4	5,0
Medel	5,0	4,6	4,6	4,8
Prall, 28-35d				
1				
2				
3				
4				
Medel				
Frostbeständighet				
14 cykler				
28 cykler				
56 cykler				

Labomgång nr 4

Tillverkningsdatum	2019 05 20	2019 05 20
Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16
vct	0,33	0,35
Anl FA	390	380
Vatten	136	136
Silika Emsac 500E	45	15
Flyt Sika Viskocrete RMC 320	0,30%	0,12%
Luft Micro Air (10%)	0,60%	0,50%
Riksten 0-8 NK	-	-
Baskarp S95	-	-
Torphyttan 0-4	37,0%	27,0%
Jehander 4-8	-	10,0%
Torphyttan 11-16	63,0%	63,0%
Färska egenskaper		
Sättnått, mm	5	5
Densitet, kg/m ³	2360	2400
Lufthalt, %	3,4	2,7
Kompakterbarhet, ICT		
Skärkraft vid 10 cykler	17	84
Kommentar	Kladdig	Lite risig
Tryckhållfasthet, 28d		
1	69,8	66,3
2	68,6	62,2
3	68,2	67,2
Medel	68,9	65,2
Spräckhållfasthet, 28d		
1	4,5	4,8
2	5,2	4,7
Medel	4,9	4,8
Prall		
1		
2		
3		
4		
Medel		
Frostbeständighet		
7 cykler	0,00	0,01
14 cykler	0,01	0,01
28 cykler	0,01	0,02
42 cykler	0,01	0,04
56 cykler		

Labomgång nr 5

Blandning nr	5J	5K	5L	5M	5N	5O
Tillverkningsdatum	2019 06 24	2019 06 24	2019 06 24	2019 06 24	2019 06 24	2019 06 24
Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16
vct	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Anl FA	360	360	350	360	370	360
Vatten	137	137	133	137	140,5	137
Flyt Sika Viskocrete 3040 W	0,30%	0,35%	0,43%	0,30%	0,35%	0,20%
Luft Micro Air (10%)	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%
Riksten 0-8 NK	-	-	54,0%	55,0%	-	-
Torphyttan 0-4	54,0%	54,0%	-	-	55,0%	40,0%
Jehander 4-8	-	-	-	11,0%	11,0%	10,0%
Torphyttan 8-11	16,0%	22,0%	22,0%	13,0%	13,0%	25,0%
Torphyttan 11-16	30,0%	24,0%	24,0%	21,0%	21,0%	25,0%
Färska egenskaper						
Sättningsdjup, mm	20	20	20	20	15	20
Densitet, kg/m ³	2380	2370	2380	2380	2380	2410
Lufthalt, %	4,0	4,4	4,1	4,4	4,1	3,1
Kompakterbarhet, ICT						
Skärkraft vid 10 cykler	-	-	-	-	-	-
Kommentar						
Tryckhållfasthet, 28d						
1	57,7	56,7	58,9	57,3	56,6	58,1
2	63,2	62,4	57,5	52,7	59,5	62,2
3	60,8	62,4	56,9	54,7	61,2	56,2
Medel	60,6	60,5	57,8	54,9	59,1	58,8
Spräckhållfasthet, 28d						
1	4,6	4,7	4,5	4,3	5,1	4,7
2	4,7	4,8	4,8	4,5	5	5
3	4,8	4,9	4,9	4,7	-	-
Medel	4,7	4,8	4,7	4,5	5,1	4,9
Tryckhållfasthet, 56d						
1						
2						
3						
Medel						
Prall						
1					27,6	24,6
2					27,4	21,7
3					26,0	23,4
4					24,4	21,3
Medel					26,4	22,8
Frostbeständighet						
7 cykler	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
14 cykler	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02
28 cykler	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,02
42 cykler	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
56 cykler	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02

Bilaga C: Materialtester KTH

Ulf Olsson, Institutionen för Maskinkonstruktion, KTH (R1&R2)

Yezhe Lyu, Institutionen för Maskinkonstruktion, KTH (R1&R2)

Lars Kraft, RISE (R2)

2019



**Nötning och luftburna nötningspartiklar från kontakten mellan dubbdäck och betongvägar –
en laboratoriestudie av fem vägbetongblandningar och två stenmaterial i en pinne-på-skiva
maskin**

Ulf Olofsson, Yezhe Lyu

Institutionen för Maskinkonstruktion KTH, SE 100 44 Stockholm, Sverige

Sammanfattning

Dubbdäckanvändning orsakar stora underhållskostnader för våra vägar. I en pinne-på-skiva maskin, placerad i ett renrum, studerades den glidande kontakten mellan dubbdäck och vägmateriäl. Totalt fem olika betongväg- och två rena stenmaterial provades mot ett dubbdäck (Nokian Hakkapeliitta 7). Den bortnötta massan, vägmaterialets hårdhet och antalet luftburna partiklar uppmättes. Resultaten visar att ett av betongvägmaterialet (med ballast från Torphyttan) uppvisar en signifikant lägre nötning i form av bortnött massa och även ett signifikant lägre antal genererade luftburna partiklar. Detta vägmateriäl var det materiäl som redovisade hårdast ballast. En reducering av normallasten mellan dubbdäck och vägmateriäl reducerar också i hög grad bortnött massa och antalet luftburna nötningspartiklar. Vid prov med de rena stenmaterialen uppvisas en jämförelsevis stor minskning av antalet luftburna partiklar medan den bortnötta massan var av samma storleksordning som de vägmateriäl som hade motsvarande ballasthårdhet som stenmaterialets hårdhet.

Nyckelord: nötning, luftburna partiklar, dubbdäck, vägbetong, sten

Abstract

The use of studded tyres causes large maintenance road maintenance costs. A pin-on-disc machine in a clean chamber was used to study the sliding contact between studded tyre and road materials. Totally five road and two pure stone materials were evaluated sliding against a studded tyre materials (Nokian Hakkapeliitta 7). Worn mass, concentration of airborne particles and the road material hardness were measured. The results show that one of the road materials (with stone from Torphyttan) shows a significant lower wear and particle concentration. A reduction of the normal load between studded tyre and road material also reduced the worn mass as well as the airborne particle concentration. For the pure stone materials, the airborne number concentration was significantly reduced although the worn mass was at similar level as for road materials with the same stone hardness level.

Keywords: wear, airborne particles, studded tires, road concrete, stone

Introduktion

Dubbdäck på svenska vägar sparar mellan 60 och 770 levnadsår i trafiken (Furberg et al [1]) pga. bättre väggrepp under vinterförhållanden. Enligt en studie från VTT [2], drar även de som kör med dubbfria vinterdäck nytta av dubbdäck eftersom dom gör vägbanan mer sträv, vilket gör att odubbade däck får bättre grepp. Användning av dubbdäck under vintermånaderna orsakar nötning av vägbanan vilket leder till kraftigt ökande underhållskostnader. Nötningen bidrar i sin tur också signifikant till mängden inandningsbara partiklar i stadsmiljön. En dubb till ett dubbdäck består av en aluminiumkärna, i vilken det sitter ett hårdmetallstift. Hårdmetallstiftet (vikt ca 0,2–0,4 g) är tillverkat av volframkarbid (WC-Co) innehållande upp till 10% kobolt. Användning av dubbdäck bidrar därmed till kobolt sprids i naturen. Kobolt är en metall som är svartlistad av hälsoskäl och fasas idag bort i många sammanhang. Noterbart är att det idag inte finns någon kravställning på dubbstiftens materiäl vad gäller tillåtna ämnen som kobolt eller materialegenskaper som hårdhet. Lagstiftningen begränsar dubbanvändningen: Från augusti 2013 är normallasten på en dubb begränsad till 120 N, dubbvikten till 1,1 g och utsticket till 1,2 mm i de nordiska länderna. Antalet dubbar är också begränsat till 50 i kontakt per rullad meter.

Betong är ett materiäl som består av bergmateriäl (ballast) sammanbundet av cementpasta. Tidigare laboriestudier på KTH [3] visar att hårdhetskillnaden mellan betongvägbansens slityta och dubbmaterialet påverkar vägsplitaget i hög grad. Ju större hårdhetskillnad, desto mer vägsplitage. Antalet luftburna partiklar ökar också med en ökande hårdhetskillnad. Resultat är i överensstämmelse med fullskaleförsök presenterade i [4], där fyra olika vägmateriäl utvärderades, och ett klart samband mellan vägmaterialets sammansättning och dubbdäcksnötning kunde identifieras. En sammanfattning av fullskaleförsöken redovisade i [5] stödjer också resultaten. En jämförelse mellan ballast av kalksten och vulkanisk sten, visar att den hårdare vulkaniska stenen nöts mindre. En översikt från 2010 [6], visar att förutom hårdare ballast, så har mikrosilika använts framgångsrikt för att minska dubbdäcksnötning.

Kontakten mellan dubb och vägbana är en rullande och glidande kontakt, se [7]. Kontaktarean motsvarar arean hos en vuxen mans hand. Dubben kommer först i kontakt med vägbanan via ett stötförlopp därefter sker en glidande rörelse genom kontakten tills dubben lämnar vägbanan. Glidhastigheten beror på kryptet (den relativa hastighetsskillnaden mellan däck och vägbana i kontakten). Vid 30 m/s (100 km/h) är den relativa glidhastigheten i kontakten vid fri rullning typiskt runt 2 m/s, men detta värde kan variera inom kontaktarean [8]. Vid höga hastigheter dominerar nötningen av dynamiska förlopp när dubben kommer in i kontakten. Här är skademekanismerna slag och krossning. Vid låga hastigheter så dominerar nötningen av repning. I [9] används en fordons hastighet om 50 km/h, som skiljehastighet mellan dynamiskt förlopp och repande förlopp.

Det finns flera utrustningar som mäter nötningsmotståndet för vägmateriäl. Två utrustningar som bygger på ansatsen att det är ett stötförlopp som står för nötningen är Prall och Tröger. I Prall vibreras kullagerkuler på vägytan, samtidigt som kallt vatten sköljer bort lösa partiklar. Metodiken för Prall är beskriven i EN 12697-16:2004. I Tröger skapas ett stötförlopp genom en vertikal stöt av en bunt med nålar mot vägbanan. Metodiken för Tröger provning är beskriven i EN 1871:2000 Annex K. De två ovan beskrivna metoderna har jämförts med VTIs vägprovningssmaskin av Snilsberg et al [10]. I VTIs vägprovningssmaskin kan både nötningen, såväl som de luftburna partiklarna som genereras från kontakten mellan däck och vägbana, studeras. Fyra hjul med justerbar hastighet är i VTIs utrustning i kontakt med vägbanan, som har en diameter på sex meter (Gustafsson et al [11]). Två andra testmetoder som använder hela däck, är en innerrörs-metod som är beskriven i [12] och en överrullningsmetod som används i Finland för godkännande av dubbdäck [13]. I överrullningsmetoden körs ett stensegment över 400 gånger i 100 km/h och stensegmentets massförlust används som kriterium för godkännande av dubbdäcken. På laboratorienivå har två utrustningar använts på KTH för att utvärdera dubbdäcksnotning. Dels en pinne-på-skivamaskin där pinnen motsvarar ett dubbdäck och skivan vägmaterialet, se [3]. Här simuleras den glidande delen i däck - vägbanakontakten där glidhastigheten och normallasten kan varieras. En izopod-pendel har också använts för att studera nötningen som dubbdäck orsakar på vägbans yta [13,14]. Här simuleras den stötande delen av dubbdäckskontakten såväl som den glidande rörelsen.

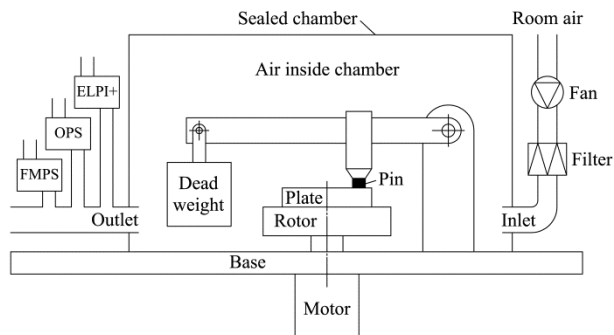
Avsikten med den här studien är att utvärdera fem olika vägbanematerial av betong och två stenmaterial med genom att simulera den glidande delen av dubbdäck-vägbanakontakten. Vidare är syftet att genomföra en tribologisk studie av nötning och luftburna nötningspartiklar från dubbdäck-vägbanakontakten.

Metod

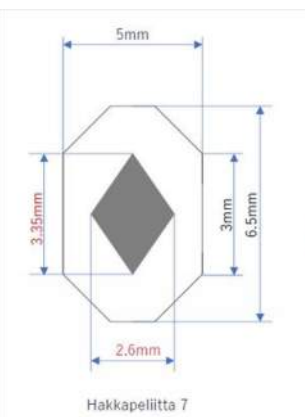
Provningen utfördes i en pinne-på-skiva maskin beskriven i Figur 1. Pinne-på-skiva maskinen har tidigare använts vid studier av nötning och luftburna partiklar orsakad av nötning, se [15, 16].

Pinnprovskroppen i pinne-på-skiva maskinen representerar ett bildäck med en 20 mm × 20 mm kvadratisk däckprov som innehåller en dubb. Figur 2 visar ett fotografi över en däckprovskropp och en vägprovskropp. Däckprovskropparna tillverkades genom vattenskrivning av bildäck. Vägprovskroppen var en rektangulär platta med storleken 80 mm × 80 mm × 15 mm. Den monterades på pinne-på-skivamaskinens rotor med ett skruvförband. En vikt användes för att trycka däckprovskroppen mot vägprovskroppen. Figur 3 visar ett fotografi över testuppställningen med en däckprovskropp och en vägprovskropp monterad. Skivan roteras med en varvtalsstyrd elektrisk motor. Friktionskraften mättes med en lastcell och nötningen mättes genom att väga provkropparna före och efter prov. Dubben orienterades så att den breda delen var vinkelrät mot glidriktningen, som i en normal däck-vägbanakontakt.

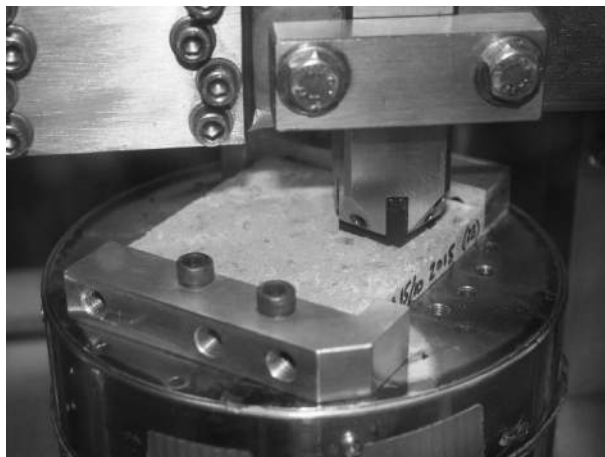
Luften som lämnade kammaren analyserades med ett mätinstrument för luftburna partiklar: OPS 3330, OPS klassificerar 0,3–10 µm partiklar i 16 storlekar. Observera att OPS mäter en optisk partikeldiameter. Innan provning så kontrollerades att varje instrument hade en nollnivå för partikelkoncentrationer. Notera att OPS 3330 har en 17e storlekskanal som registrerar partiklar större än 10 µm. Denna kanal användes inte i denna studie. Samplingsfrekvensen var 1 Hz.



Figur.1. Skiss över pinne-på-skiva testriggen.



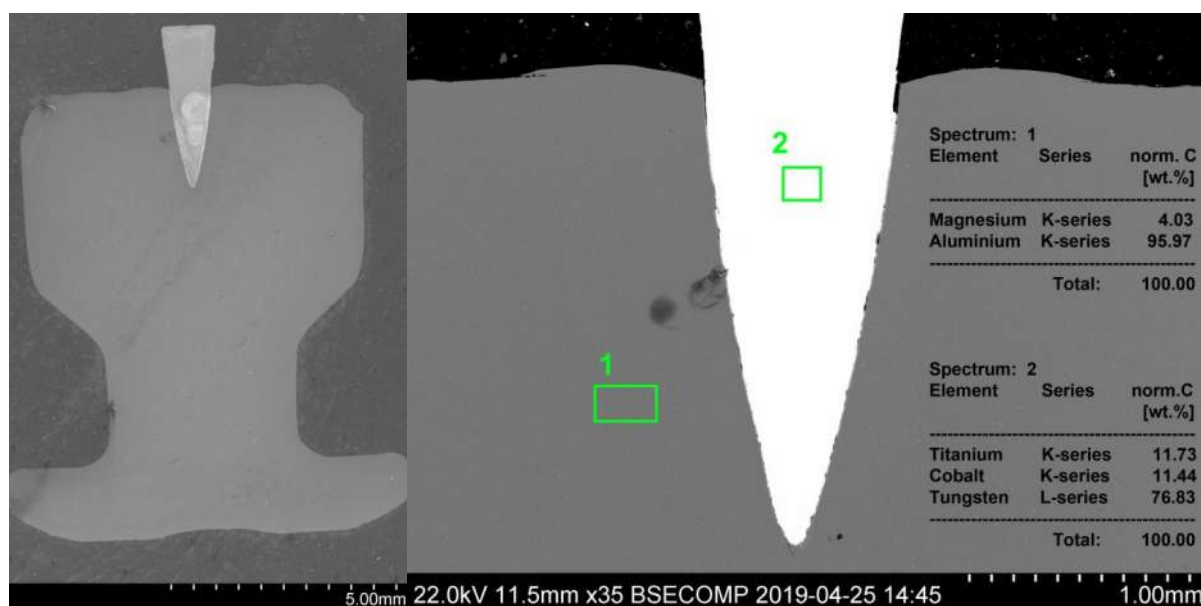
Figur 2. Till vänster vägmateriälsprovskropp och däckprovskropp. Till höger geometri för dubb, glidriktning är mot den breda diagonalen.



Figur.3. Provuppställning med betongvägsprovskropp som skiva, och däckprovskropp monterad som pinne.

Däckprovskropparna kommer från däck av modellen Nokian Hakkapeliitta 7, som var inkörda 500 km. Figur 4 visar ett tvärsnitt av en dubb med aluminiumkropp och stift av hårdmetall, samt en tillhörande EDX analys. Hårdmetallstiftet innehåller karbider av titan, kobolt och volfram. Aluminiumlegeringen innehåller förutom aluminium ca 4 % magnesium. Totalt fem vägmateriäl provades: Betong 1A, Betong 4A, Betong 5A, Betong 5C, Betong 7A. Dessutom provades två stenmaterial: granit och skiffer. Tabell 1 visar en översikt över de provade vägmateriälen. I appendix A presenteras en mer detaljerad sammanställning över de utvärderade vägmateriälen. Samtliga vägmateriäl tillverkades av Cementa i Slite efter recept av blandningsgruppen i projektet. Samtliga provkroppar (väg- och rena stenmaterial)

var tillverkade genom sågning. Slitageprovningsen utfördes efter två månaders härdning av vägmaterialet.



Figur 4. Tvärsnitt av dubb med aluminiumkropp och hårdmetallstift. Resultat från ämnesanalys med EDX presenteras också.

Tabell 1. Namn på väg- och stenmaterial, ingredienser och förkortningar på dessa.

Betongrecept/ingrediens	Namn
Sten: 11-16mm Durasplit	1A-Durasplit
Sten: 11-16mm Hovgården	4A-Hovgården
Sten: 11-16mm Torphyttan	5A-Torphyttan
Sten: 11-16mm Torphyttan	5C-Torphyttan
Sten: 11-16mm Hovgården	7A-Enhörna
Granit sågad "grey star"	Granit
Offerdalskiffer sågad	Skiffer

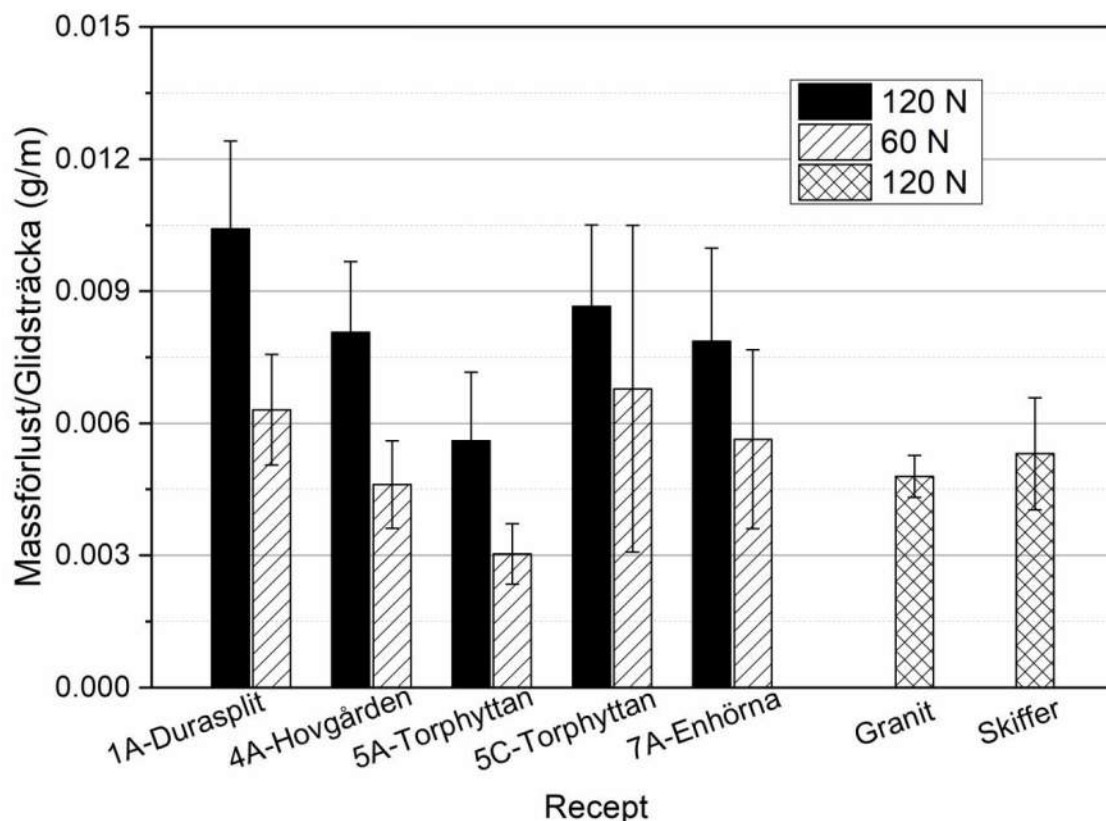
Fyra prov per vägmateriel och lastnivå genomfördes. Två lastnivåer utvärderades: 120 och 60 N. Notera att för de rena stenmaterialen genomfördes bara prov på lastnivå 120 N. Detta berodde på ett begränsat antal tillgängliga provkroppar. Den totala glidsträckan var 5 m och glidhastigheten 0,1 m/s.

För att mäta massan bortnött material vägdes provkropparna med en våg (Mettler Toledo XP20035, noggrannhet 1mg) före och efter prov. Innan vägning och innan prov i testutrustning, var provkropparna placerade i en klimatkammare med 50 % relativ luftfuktighet och en temperatur om 22 °C i 24 h.

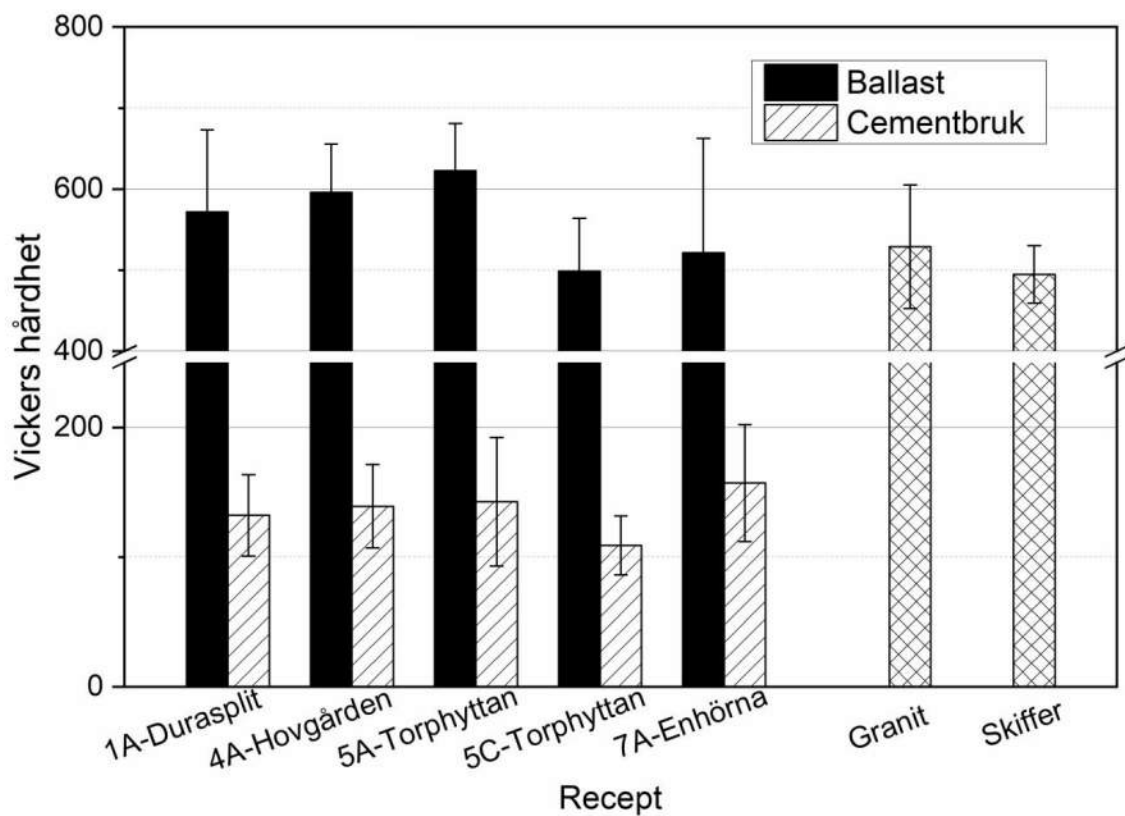
Efter proven analyserades nötningspåren med en ett släpnålsinstrument Talysurf intra som har en upplösning om 16nm vid ett mätområde på 1mm. Totalt fem mätningar genomfördes på varje väg- och stenmaterial. En hårdhetsmätare, Krautkrämer Dynamics, som mäter enligt LEEB hårdhetsvärde (HL), vilket är ett förhållande av rekylhastigheten och anslagshastigheten användes på betongprovkropparna och stenprovkropparna. HL-värdet konverteras sedan till hårdhetsvärden enligt Vickers. Tio hårdhetsmätningar genomfördes på ballastdelen, och tio genomfördes på cementpastadeln. För de rena stenmaterialen genomfördes tio hårdhetsmätningar på respektive material. Hårdhetsmätaren kalibrerades med en hårdhetsnormal före och efter mätning, och avvikelsen från hårdhetsnormalen av stål var som mest i medelvärde av 10 mätningar 3 HV.

Resultat

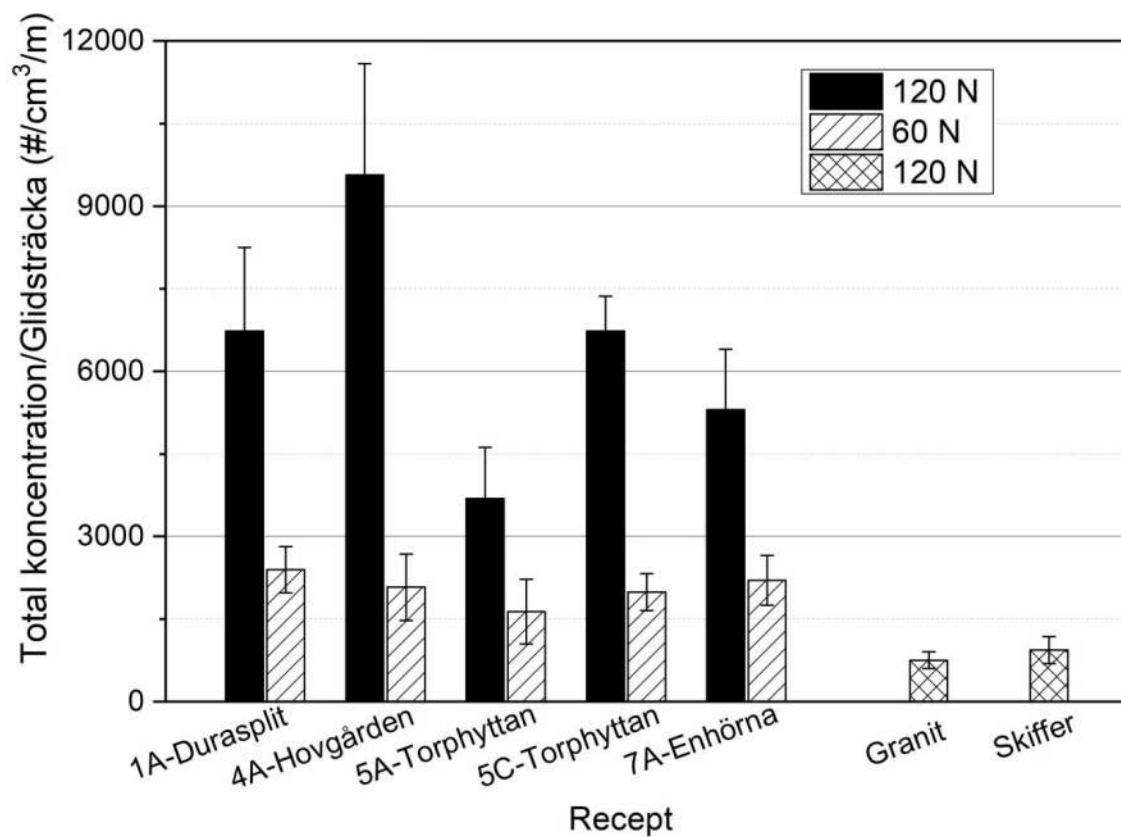
Figur 5 visar på nötningen för respektive vägmateriäl i form av massförlust dividerat med sträckan som dubben har glidit mot materialet. Figur 6 visar på hårdheten för respektive vägmateriäl i enheten Vickers. I figur 7 redovisas total koncentration av luftburna partiklar mindre än 10 μm per meter glidsträcka. Noterbart här är de väsentligt lägre halterna för de två rena stenmaterialen. Om vi studerar resultaten i Figurerna 5 och 7 ser vi att koncentrationen luftburna partiklar per meter glidsträcka rankar på samma sätt som massförlust per meter glidsträcka för de rena vägbeläggingsmaterialen. Detsamma gäller för de två rena stenmaterialen. Figurerna 5 och 7 visar också på ett tydligt lastberoende både för nötningen och för koncentrationen luftburna partiklar om man jämför resultaten för prov vid 120 N respektive 60 N i normalkraft. Jämför man Figurerna 5 och 7 med Figur 6 ser man att både nötningen och koncentrationen av luftburna partiklar minskar med en ökad hårdhet hos ballasten respektive stenmaterialet. Figurer 8 redovisar storleksfördelningar över medelvärdet under provtiden för antalet uppmätta partiklar. Resultaten för antalsfördelningen visar på en storleksfördelning som har toppar kring 2 μm 1 μm samt en mindre storlek under instrumentets detekteringsgräns för alla provade vägmateriälkombinationer. De två rena stenmaterialen visar på samma beteende men på en mycket lägre koncentrationsnivå. Figur 9 visar foton över de provade vägmaterialet efter prov. På samtliga ytor syns spår efter dubbstiftets kontakt med vägmaterialets yta. I figur 10 redovisas exempel på nötningsprofilens djup efter prov med 120 N i last. Tabell 2 redovisar maximalt nötningsdjup efter prov också för 120 N i last.



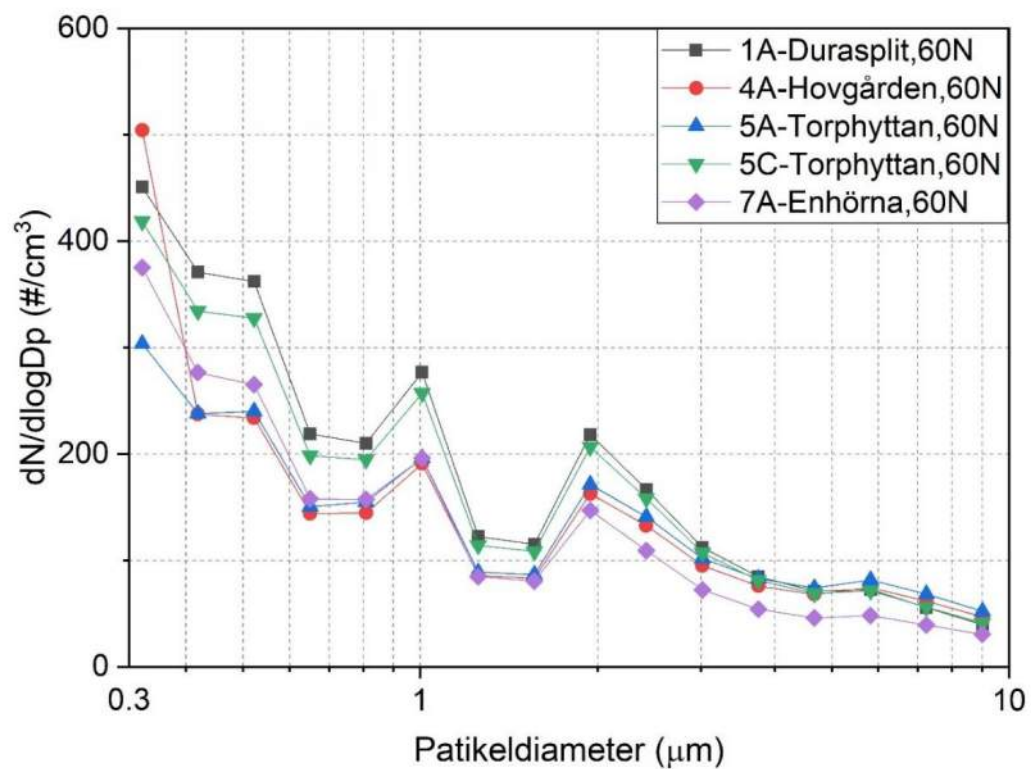
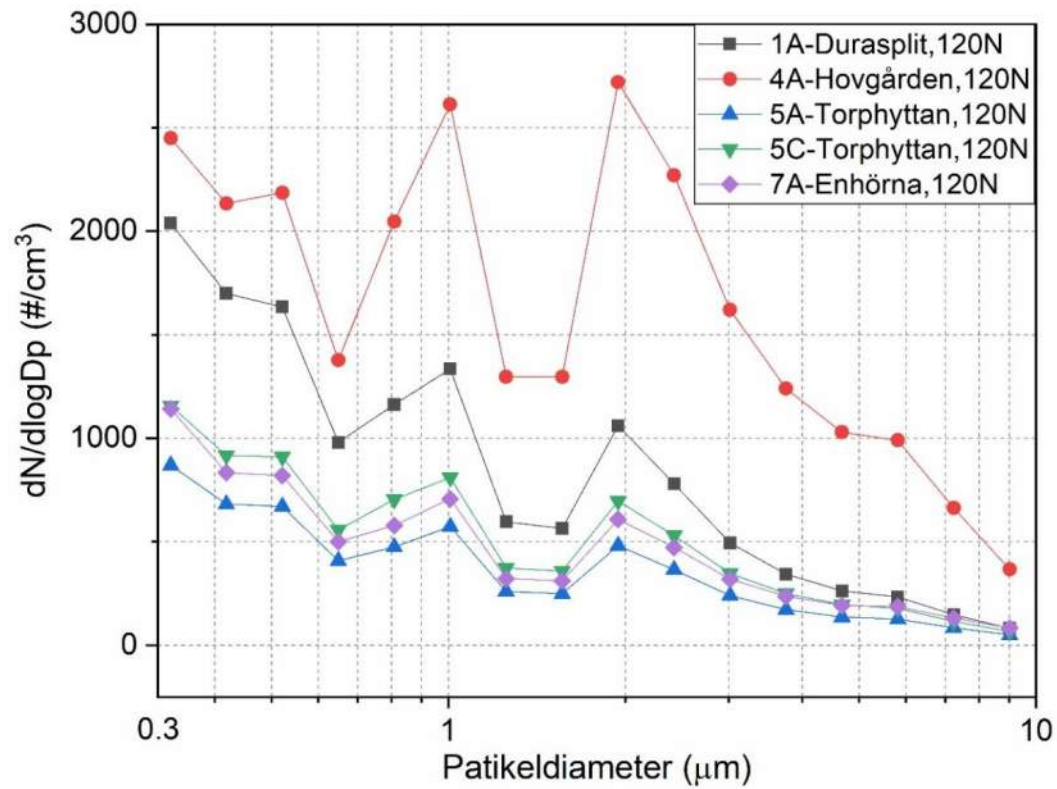
Figur. 5 Massförlust per meter glidsträcka, provresultat angivet som medelvärde och standardavvikelse.

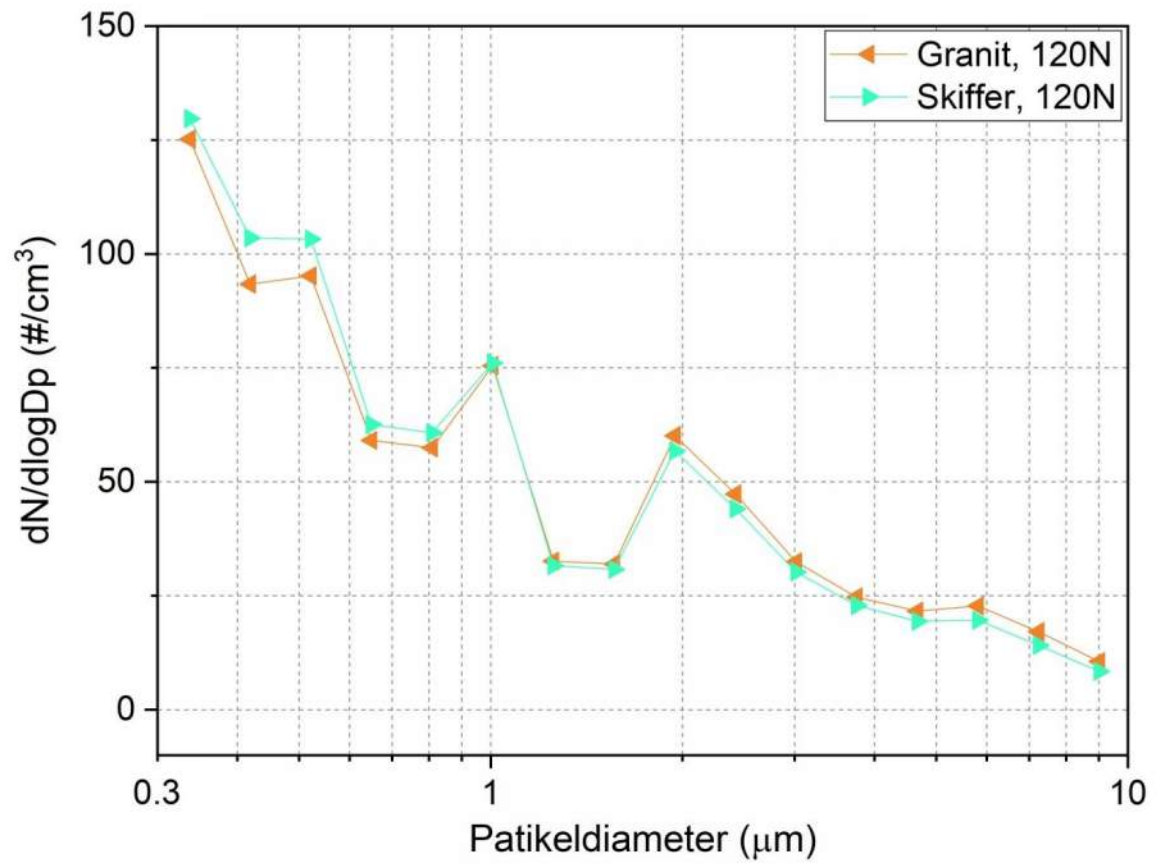


Figur. 6 Hårdhet, provresultat angivet som medelvärde och standardavvikelse.



Figur 7. Total koncentration uppmätta partiklar per meter glidsträcka för mätinstrument OPS. Enskilda provresultat samt medelvärde och standardavvikelse.





Figur 8. Medelvärde av storleksfördelning baserat på antal partiklar uppmätta med OPS.



1A-Durasplit



4A-Hovgården



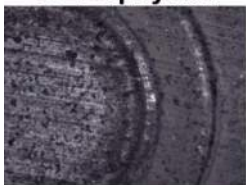
5A-Torphyttan



5C-Torphyttan



7A-Enhörna

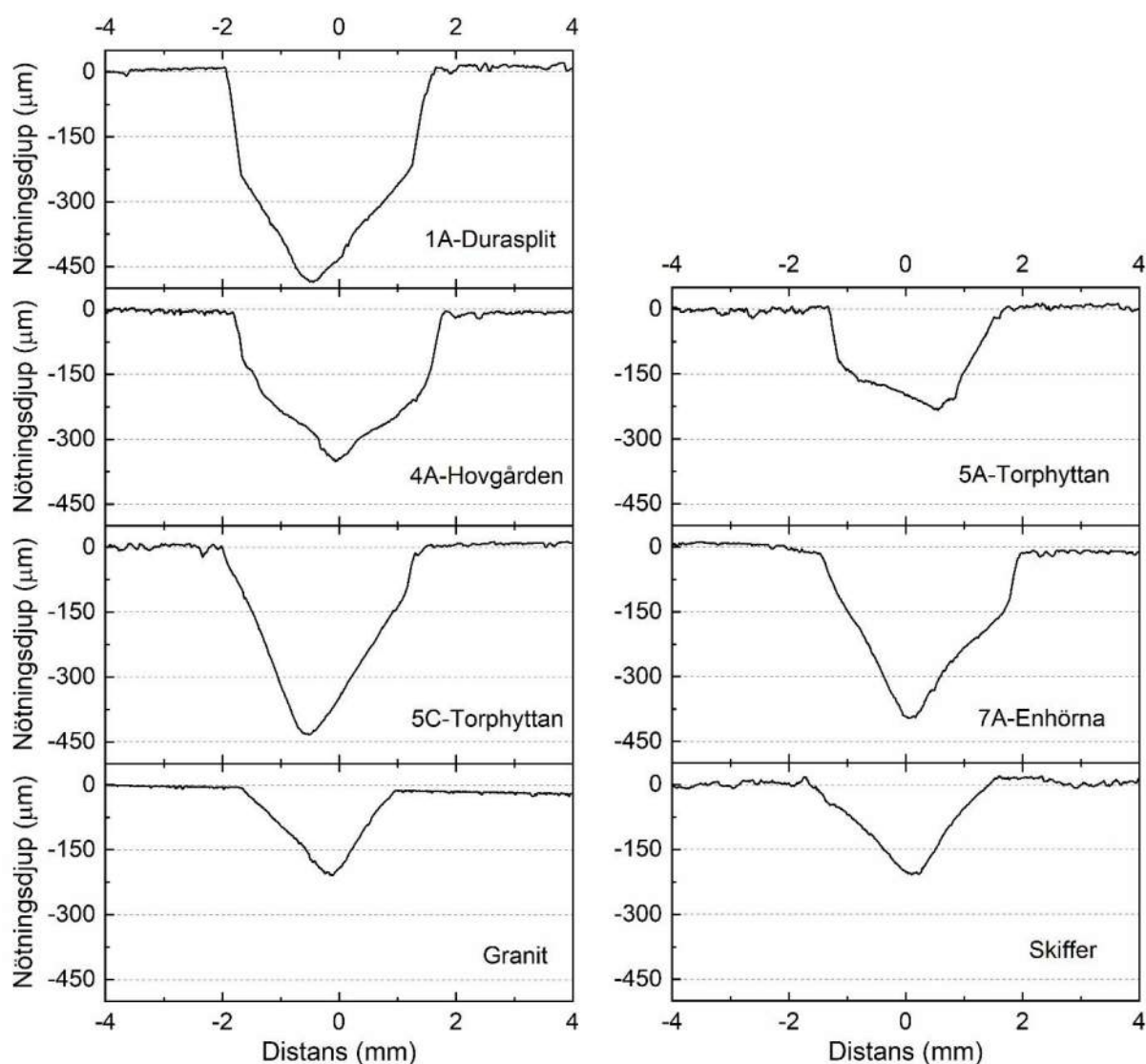


Granit



Skiffer

Figur 9. Foto över del av respektive vägmaterialets kontaktyta efter prov. I samtliga fall syns spår av dubbstiftets kontakt med ytan.



Figur 10. Typiska exempel på nötningsdjup efter prov för respektive väg- och stenmaterial.

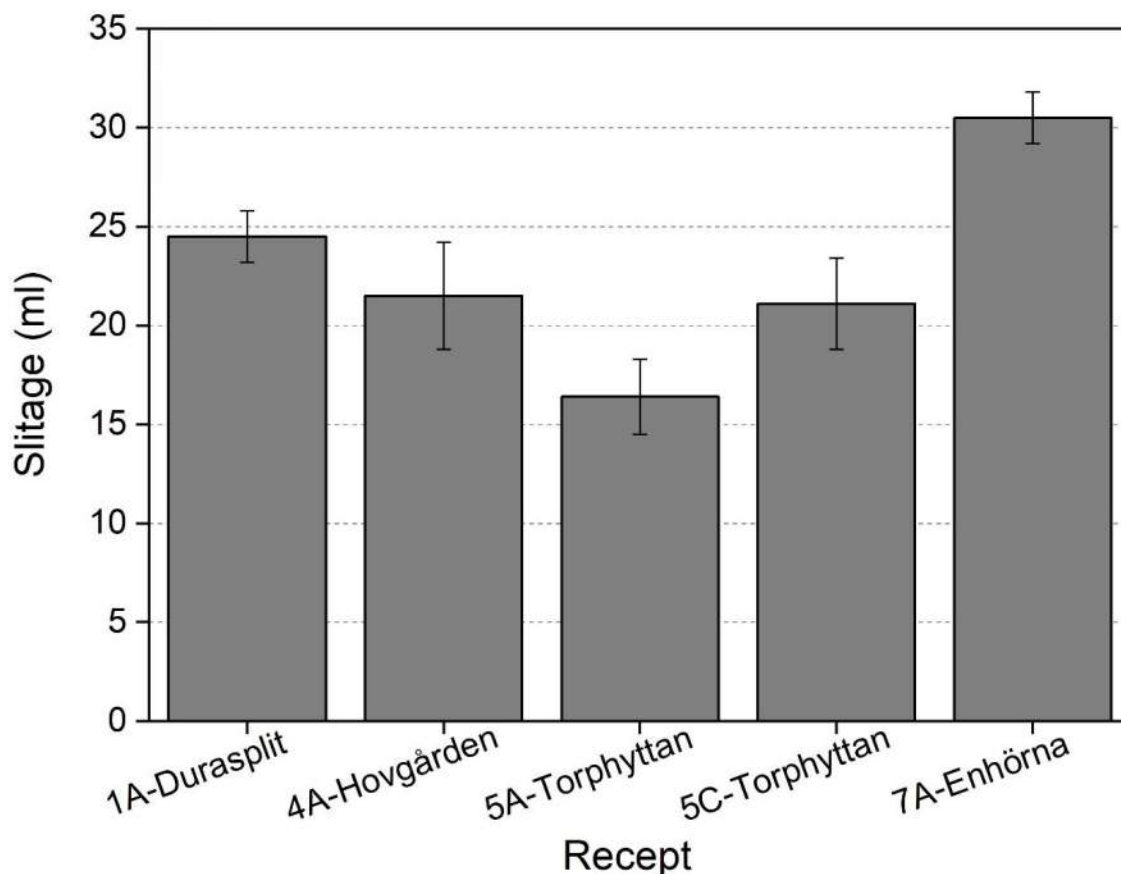
Tabell 2. Maximalt uppmätt nötningsdjup efter prov. Provresultatet presenteras för respektive väg- och stenmaterial som medelvärde och standardavvikelse.

Recept	1A-Durasplit	4A-Hovgården	5A-Torphyttan	5C-Torphyttan	7A-Enhörna	Granit	Skiffer
Nötningsdjup (µm)	-436±73	-327±56	-212±66	-403±68	-382±92	-193±16	-206±21

Diskussion

Jämför man Figurerna 5 och 6 ser man att nötningen för vägprovskropparna tillverkade av betong visade lägst värde för betong 5A samtidigt som stenen i betong 5A visar högst värde på hårdhetsproven. Detta resultat att hårdare sten leder till minskad nötning är i överensstämmelse med tidigare resultat presenterade i [3]. Resultat av nötningens beroende av ballastens hårdhet är också i överensstämmelse med fullskaleförsök presenterade i [4], där fyra olika vägmateriäler utvärderades, och ett klart samband mellan vägmateriälets sammansättning och dubbdäcksnotning kunde identifieras. En sammanfattning av fullskaleförsöken redovisade i [5] stödjer också resultaten. Prallprovning utförd på samtliga betongvägmateriäler provades av VTI enligt SS-EN 12697-16. Resultaten presenteras i Appendix B och

sammanfattas i Figur 11. Prallprovningen visar också att betong 5A är mest nöttningsbeständig. Prallprovningen rangordnar storleken på nötningen på samma sätt som för de här redovisade pinne-på-skivaproven utom för betong 7A, som redovisar betydligt högre nivåer på nötningen i Prallprovningen. Foton över vägbetong och de rena stenproverna efter prov presenterade i Figur 9 visar på nötning av samtliga provkroppar som också är redovisade som exempel i Figur 10. Man ser en spetsig form på nöttningsdjupet som troligen orsakas av att dubben kan röra sig inne i däcksmaterialet och ställer sig i en lutande position när dubben glider mot vägmaterialet. Det uppmätta spår djupet (Tabell 2) rangordnar nötningen av väg- och stenmaterialen på samma sätt som den uppmätta massförlusten i Figur 5 och betong 5A är den mest nöttningsbeständiga. Spår djupet i Tabell 2 visar på att även de rena stenmaterialen nöts ner av dubbstiften. Att även rena stenmaterial nöts ner av dubben kan förklaras av den stora hårdhetsskillnaden mellan dubbstiftet och stenen i vägmaterialet, se [3].



Figur 11. Slitage för vägmaterialet uppmätt enligt Prallmetoden, provresultat angivet som medelvärde och standardavvikelse.

Figur 7 visar att betong 5 A även visar de lägsta koncentration av luftburna partiklar. Detta resultat är också i överensstämmelse tidigare resultat [3] desto hårdare sten desto lägre koncentration av luftburna partiklar. På samma sätt rangordnar de rena stenproverna resultaten. Den hårdare graniten nöter mindre och genererar lägre partikelkoncentrationer jämfört med den mjukare skiffen. En lägre last på dubben ger lägre nötning och lägre partikelkoncentrationer för betongprovkropparna, se Figurerna 5 och 7. Detta är i överensstämmelse med tidigare resultat presenterade i [3].

Antalsfördelningen visar på en storleksfördelning som har toppar kring 2 μm 1 μm samt en mindre storlek under instrumentets detekteringsgräns för alla provade vägmaterialkombinationer. Antalsfördelningarna för de luftburna partiklarna som presenteras i Figur 8 visar att det är samma storleksfördelningar som tidigare uppmäts för betongprovkroppar i kontakt med dubbdäcksmaterial, se [3]. Topparna på fördelningarna ligger i samtliga fall på 1 och 2 μm . Antalsfördelningarnas utseende är

i överstämmelse med tidigare studier för luftburna partiklar genererade från mekanisk nötning, se [15] och [16].

Slutsatser

Nötning och dess alstring av luftburna partiklar, när ett dubbdäck är i kontakt med vägmateriäl har studerats. En pinne-på-skivamaskin placerad i en kammare med ren luft användes. Följande slutsatser kan dras från den genomförda studien:

- Nötningen och partikelkoncentration för vägmateriälen av betong uppvisar en invers proportionalitet mot ballastens hårdhet. Ju mjukare materiäl desto mer nöts vägmaterialet av betong och desto mer ökar halten av de luftburna partiklarna. Två rena stenmateriälen visar samma rankning av hårdhetens inverkan. Även de rena stenmateriälen uppvisar en mätbar nötning orsakad av dubbstiften.
- En sänkning av normallasten reducerar nötningen och partikelkoncentrationen för vägmateriälen av betong.
- En antalsfördelning med två toppar (1 och 2 μm) kunde registreras för vägmateriälen av betong. För de rena stenmateriälen kunde motsvarande toppar om (1 och 2 μm) registreras.

Tack

Denna rapport är en delrapport inom det av Trafikverket finansierade BVFF projektet ”Hållbara betongvägar”. Författarna tackar blandningsgruppen: Niklas Johansson Cementa, Sten Hjelm, Cementa och Iad Saleh, NCC Teknik för tillverkningen av provkropparna, och de övriga projektdeltagarna: Lars Kraft Rise CBI, Åsa Laurell Lyne RISE CBI, Thomas Johansson Skanska Roger Nilsson Skanska, Mats Gustafsson VTI, Ellen Dolk VTI, Niklas Johansson Heidelbergcement, Björn Kullander Trafikverket, Johan Silwerbrand KTH, och Erik Simonsen Cementa för värdefulla synpunkter under projektet.

Referenser

- [1] Furberg, A.; Arvidsson, R.; Molander, S. Dissipation of tungsten and environmental release of nanoparticles from tire studs: A Swedish case study. J. Clean. Prod. 2018. under review.
- [2] Peltola, P.; Wikström, E. Tyre stud derived tungsten carbide particles in urban street dust. Boreal Environ. Res. 2006, 11, 161–168.
- [3] Olofsson U., Tu M., Nosko O., Lyu Y., Nötning och luftburna partiklar från kontakten mellan dubbdäck och betongvägar – en laboriäriestudie i en pinne-på-skiva maskin, TRITA-MMK 2018:01, Institutionen för Maskinkonstruktion KTH 2018.
- [4] Preus C.K. Effect of studded tires on pavement wear and traffic safety, Minnesota Highway Department USA (1973).
- [5] Significance of tests and properties of concrete & concrete making materials, ASTM 169D, Eds Lamond J., and Pielert J (2006)
- [6] Cotter A., Muench S.T., Studded Tire Wear on Portland Cement Concrete Pavement in the Washington State, Department of Transportation Route Network, WSDOT Research Report (2010), WA-RD 744.3.
- [7] Gültlinger J., Gauterin F., Brandau C., Schlittenhard J., Wies B., Investigations of Road Wear Caused by Studded Tires, Tire Science and Technology Volume 42, Issue 1, January 2014, Pages 2-15.
- [8] Pacejka HB Tyre and vehicle dynamics. Butterworth–Heinemann, Oxford (2002)
- [9] Torbjörn Jacobson Trafikverket, Workshop Slitstarkare beläggningar för framtiden, 2013.
- [10] Snilsberg B., Myran T., Uthus N., Aurstad J., Evaluation of different laboratory methods for simulation of pavement wear and road dust generation from studded tires,. Road Materials and Pavement

Design Volume 9, (2008) 287-304 Issue sup1: SPECIAL ISSUE ON ASPHALT TECHNOLOGY (EATA 2008). doi.org/10.1080/14680629.2008.9690170

[11] Gustafsson M., Blomqvist G., Gudmundsson A., Dahl A., Jonsson, P., Swietlicki E., Factors influencing PM10 emissions from road pavement wear, Atmospheric Environment Volume 43, Issue 31, October 2009, Pages 4699-4702.

[12] Determination of road wear caused by studded winter tyres, Test world 23-6-2010, www.testworld.fi

[13] Sánchez G., TEST DEVELOPMENT AND SIMULATION OF THE BRITISH PENDULUM TESTER FOR STUDED TIRES WEAR, Master of Science Thesis MMK 2017:72 MKN 182, Maskinkonstruktion KTH 2017.

[14] Kozuka R., Studded tire wear - comparison between British Pendulum and Pin on disc testing, Master of Science Thesis MMK 2017: MKN 188, Maskinkonstruktion KTH 2017.

[15] Olofsson U., Olander L., and Jansson, A., A Study of Airborne Wear Particles Generated from a Sliding Contact, J. Tribol. 131, 044503, 2009, doi:10.1115/1.3176990

[16] Olofsson U., A Study of Airborne Wear Particles Generated from the Train traffic—Block Braking Simulation in a Pin-on-Disc Machine, Wear 271(1-2) 2011

Resultat Prall enligt SS-EN 12697-16								
VTInr	18-084			Skrym				
						Pralltest		
Serie	Provnr	provomg.	testdatum	pbssd (g/ml)	Vikt efter vattenlagring, M1 (g)	Vikt efter Prall; M2 (g)	Slitage; AbrA (ml)	
1A	1A-1	omg1. best 181106	2018-11-23	2,448	621,0	562,4	23,9	
1A	1A-2	omg1. best 181106	2018-11-23	2,438	611,5	547,1	26,4	
1A	1A-3	omg1. best 181106	2018-11-23	2,454	625,3	567,8	23,4	
1A	1A-4	omg1. best 181106	2018-11-23	2,467	591,3	531,7	24,2	
						Medel	24,5	
						Standardavvikelse	1,3	
						Variationskoefficient	5,4	
4A	4A-1	omg1. best 181106	2018-11-27	2,406	570,2	511,8	24,3	
4A	4A-2	omg1. best 181106	2018-11-27	2,424	596,4	550,5	18,9	
4A	4A-3	omg1. best 181106	2018-11-27	2,413	613,1	556,8	23,3	
4A	4A-4	omg1. best 181106	2018-11-27	2,419	611,7	564,5	19,5	
						Medel	21,5	
						Standardavvikelse	2,7	
						Variationskoefficient	12,5	
5A	5A-1	omg1. best 181106	2018-11-23	2,422	608,9	568,6	16,6	
5A	5A-2	omg1. best 181106	2018-11-23	2,434	609,3	571,7	15,4	
5A	5A-3	omg1. best 181106	2018-11-23	2,445	615,4	579,8	14,6	
5A	5A-4	omg1. best 181106	2018-11-23	2,430	626,6	580,6	18,9	
						Medel	16,4	
						Standardavvikelse	1,9	
						Variationskoefficient	11,6	
5C	5C-1	omg1. best 181106	2018-11-23	2,363	491,0	434,5	23,9	
5C	5C-2	omg1. best 181106	2018-11-23	2,394	555,8	509,1	19,5	
5C	5C-3	omg1. best 181106	2018-11-23	2,393	558,7	506,2	21,9	
5C	5C-4	omg1. best 181106	2018-11-23	2,407	571,7	526,3	18,9	
						Medel	21,1	
						Standardavvikelse	2,3	
						Variationskoefficient	11,0	
7A	7A-1	omg1. best 181106	2018-11-23	2,459	614,7	543,4	29,0	
7A	7A-2	omg1. best 181106	2018-11-23	2,466	678,0	604,4	29,9	
7A	7A-3	omg1. best 181106	2018-11-23	2,495	615,4	535,9	31,9	
7A	7A-4	omg1. best 181106	2018-11-23	2,488	674,3	596,1	31,4	
						Medel	30,5	
						Standardavvikelse	1,3	
						Variationskoefficient	4,4	



**Laboratoriestudie av nötning i kontakten mellan dubbdäck och betongvägar –
jämförelse mellan två betongrecept med tre olika stensorter i fyra olika laboratorieprovmetoder**

Ulf Olofsson¹, Yezhe Lyu¹, Lars Kraft²

¹Institutionen för Maskinkonstruktion KTH, 100 44 Stockholm Sverige

²RISE CBI Betonginstitutet, 114 86 Stockholm Sverige

Sammanfattning

En experimentell studie har utförts för att mäta nötning i kontakten mellan dubbdäck och betongvägmaterial. Totalt sex olika betongvägmaterial, två betongrecept och tre stenmaterial, utvärderades med fyra olika laboratorieprovningssmetoder: pinne-på-skivaprov, pendelprov, Prallprov och Böhmeprov. Vid pinne-på-skivaprov och i pendelprov användes ett dubbdäck (Nokian Hakkapeliitta 7) som motyta. Vid Prallprov och Böhmeprov användes stålkulor respektive en stålskiva som motyta. Den bortnötta massan uppmättes i de fyra olika provmetoderna, dessutom uppmättes betongvägmaterialens hårdhet. Resultaten visar att betongvägmaterialen med hårdast ballast visade en signifikant lägre nötning i dom båda provmetoderna (pinne-på-skiva och pendel) som använde dubbdäck som motyta. Fler variabler såsom total ballastvolym, D_{max} och v_{ct} , påverkar också betongvägmaterialens nötning. För de övriga två provmetoderna var rankningen av betongvägmaterialens nötning motsatt mot de som erhöles med pinne-på-skiva och pendel.

Nyckelord: nötning, dubbdäck, vägbetong

Abstract

An experimental study of the wear from the studded tire to concrete road contact has been performed. Totally six different concrete road materials were evaluated in four different test methods: pin-on-disc test, friction pendulum test, Prall test and Böhme test. For the pin on disc test and pendulum test a studded tyre was used as counter surface (Nokian Hakkapeliitta 7). For the Prall and the Böhme tests was steel balls respectively a steel disc utilized as counter surface. The wear was for each method measured and also the hardness of concrete road materials. The results show that the concrete road material with the highest stone hardness had a significant lower wear value in both test methods (pin on disc and friction pendulum) that used a studded tyre as counter surface. More variables as ballast volume, v_{ct} and D_{max} , also influence the wear. For the other two test methods the ranking of the concrete road materials wear resistance was opposite to the one from the results achieved with the pin-on-disc and pendulum tests.

Keywords: wear, studded tires, concrete road

Introduktion

Användning av dubbdäck under vintermånaderna orsakar nötning av vägbanan. 1999 var det årliga nötningen av vägarna i Sverige, ca 110 000 ton [1]. Det var en minskning från tidigare notering om 450 000 ton 1989. Minskningen antas bero på bättre vägkvalitet och en införd kvavställning via lagstiftning på dubbdäck. Sedan bottennoteringen 1999 har den årliga nötningen ökat igen till ca 150 000 ton och ökningen antas bero på en ökad trafikintensitet. Kostnaden för dubbdäcksnötningen på det statliga vägnätet beräknades 2006 [1] ligga mellan 300 och 400 Mkr per år. Utöver det uppskattades 2006 nötning av vägmarkeringar till ca 50 Mkr per år. Förutom den stora kostnaden orsakar dubbarna nötning också en kraftig ökning av inandningsbara luftburna partiklar, vilket orsakar miljöproblem i städerna, såsom sämre luft. På grund av detta begränsar lagstiftningen dubbanvändningen. Från augusti 2013 är normallasten på en dubb begränsad till 120 N, dubbvikten till 1,1 g och utsticket till 1,2 mm. Antalet dubbar är också begränsat till 50 st. i kontakt per rullad meter.

Vid höga hastigheter domineras nötningen av dynamiska förlopp när dubben kommer in i kontakten. Här är skademekanismerna slag och krossning. Vid låga hastigheter så domineras nötningen av en glidande nötning s.k. repning. I [2] används en fordons hastighet om 50 km/h som skiljehastighet mellan dynamiska förlopp och repande förlopp.

I Sverige används normalt bitumen som vägmaterial, men i länder där dubbdäck är förbjudna används också betong som vägmaterial. I vägbetong är ca 70 volymprocent stenmaterial (ballast) och resterande ca 30 % är en pasta med olika innehåll. Bitumenvägar (asfaltsvägar) består av ca 83 volymprocent stenmaterial, ca 12 % bitumen och ca 5 % filler.

Det finns flera utrustningar som mäter nötningsmotståndet för vägmateriäl. En utrustning som bygger på ansatsen att det är ett stötförlopp som står för nötningen är Prall. I Prall vibreras kullagerkulor på vägytan, samtidigt som kallt vatten sköljer bort lösa partiklar. Metodiken för Prall är beskriven i [3] och är ursprungligen utvecklad för provning på bituminösa vägmateriäl. På laboratorienivå används två utrustningar där däckprovkroppar med dubb nöter provkroppar av vägmateriäl. Dels har en pinne-på-skivamaskin använts, där pinnen utgör en dubb från ett dubbdäck och skivan är en utsågad platta av vägbeläggning, se [4]. Här simuleras den glidande nötningsdelen i däck-vägbanakontakten, och glidhastigheten och normallasten kan varieras. Dels har en friktionspendel använts [5, 6]. Här simuleras både den stötande dynamiska och den glidande nötningen av dubbdäckskontakten mot vägmateriälet. Man kan även prova ballastens abrasionsmotstånd. Det kan t.ex. göras med kulkvarnsmetoden (Nordic ball mill test) [7]. För betonggolv finns flera metoder att utvärdera nötningsmotståndet. I en metod nöts en utsågad platta av betong med eller utan abrasivt medium mot en roterande stålskiva, ett så kallat Böhmeprov [8].

Syftet med föreliggande arbete är främst att jämföra nötningen på olika vägbetongsmateriäl. I Sverige saknas för närvarande standardiserade metoder för sådana provningar, då de tillgängliga metoder som är presenterade ovan, är utvecklade för provning av bitumenvägmateriäl. När det gäller provning av endast ballasten föreligger givetvis inga skillnader, dock med vetskapen om att det totala ballastinnehållet i vägbetong är ca 70 volymprocent [9] att jämföra med 80 volymprocent i asfalt [10]. Studien utvärderar nötningen av olika vägbetongbeläggningar mot dubbdäckskontakten genom att använda fyra olika provmetoder: Pinne-på-skiva, Friktionspendel, Prall och Böhme.

Material

Totalt provades sex olika betongrecept: Betong 2H, Betong 2D, Betong 2R, Betong 5.1H, Betong 5.1D och Betong 5.1R. Två olika recept har provats med tre olika ballastsorter. Det ena receptet har en något annorlunda kornkurva, med en jämnare kornstorleksfördelning för de mindre kornstorlekarna. Tabell 1 visar en översikt över de provade vägmateriälerna. Vattencementtalet (vct) är förhållandet mellan vatten och cement. Dmax är den största använda stenstorleken i betongen. Samtliga vägmateriäl tillverkades av RISE CBI. I Appendix 1 Tabell 1.1, redovisas data för kulkvarnsvärde [9] på de tre olika ballastsorterna. De angivna kulkvarnsvärdena är värden från ballastleverantörerna.

I Appendix 1 Figur 1.1 och Figur 1.2 visas uppmätt hållfasthet på de olika betongrecepten som en funktion av härdningstiden där proverna har förvarats i vatten. Provning har skett enligt standarder [11, 12]. Hållfasthetsvärdena sprider inte så mycket, förutom att Betong 2R uppvisar lägre hållfasthet än övriga recept pga. högre lufthalt. Högst tryckhållfasthet efter 90 dagar hade Betong 2H och Betong 2D, med värden på 83 MPa respektive 84 MPa. Högst spräckhållfasthet hade Betong 5.1H och Betong 5.1D på 6,6 MPa. Recept 2, med mindre storlek på Dmax, och lägre cementhalt, pastamängd och vct, gav något högre tryckhållfasthet men lägre spräckhållfasthet jämfört med recept 5.1. Ingen klar tendens fanns på skillnader i hållfasthet för de olika ballastsorterna.

Tabell 1. Namn på vägmateriäl, ingredienser och förkortningar på dessa.

Betongrecept/ingrediens	Namn
Dmax 11 mm, Hovgården, 60 % grovballast, vct=0,36	Betong 2H
Dmax 11 mm, Durasplit 60 % grovballast, vct=0,34	Betong 2D
Dmax 11 mm, Ryolit 60 % grovballast (med Hovgården 2-5 mm), vct=0,36	Betong 2R
Dmax 16 mm, Hovgården 60 % grovballast, jämnare kornkurva, vct=0,37	Betong 5.1H
Dmax 16 mm, Durasplit 60 % grovballast, jämnare kornkurva, vct=0,37	Betong 5.1D
Dmax 16 mm, Ryolit 60 % grovballast (med Hovgården 2-5 mm), vct=0,35	Betong 5.1R

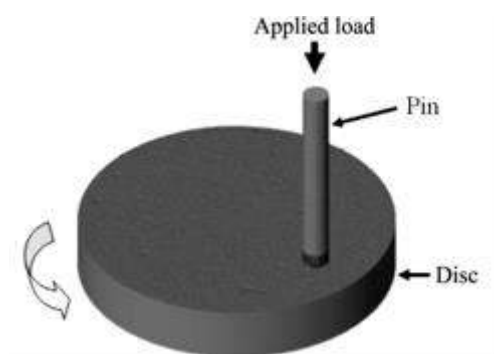
Experimentella metoder

Nötnings- och hårdhetsprovningen på de olika materialen skedde efter tre månaders härdning av respektive vägmateriäl. Provningsen utfördes i en pinne-på-skivamaskin, som är beskriven i Figur 3, och i en pendelprovningmaskin, som är beskriven i Figur 4. Dessutom utfördes provning med hjälp av Prallmaskin enligt [3] och Böhmemaskin enligt [8].

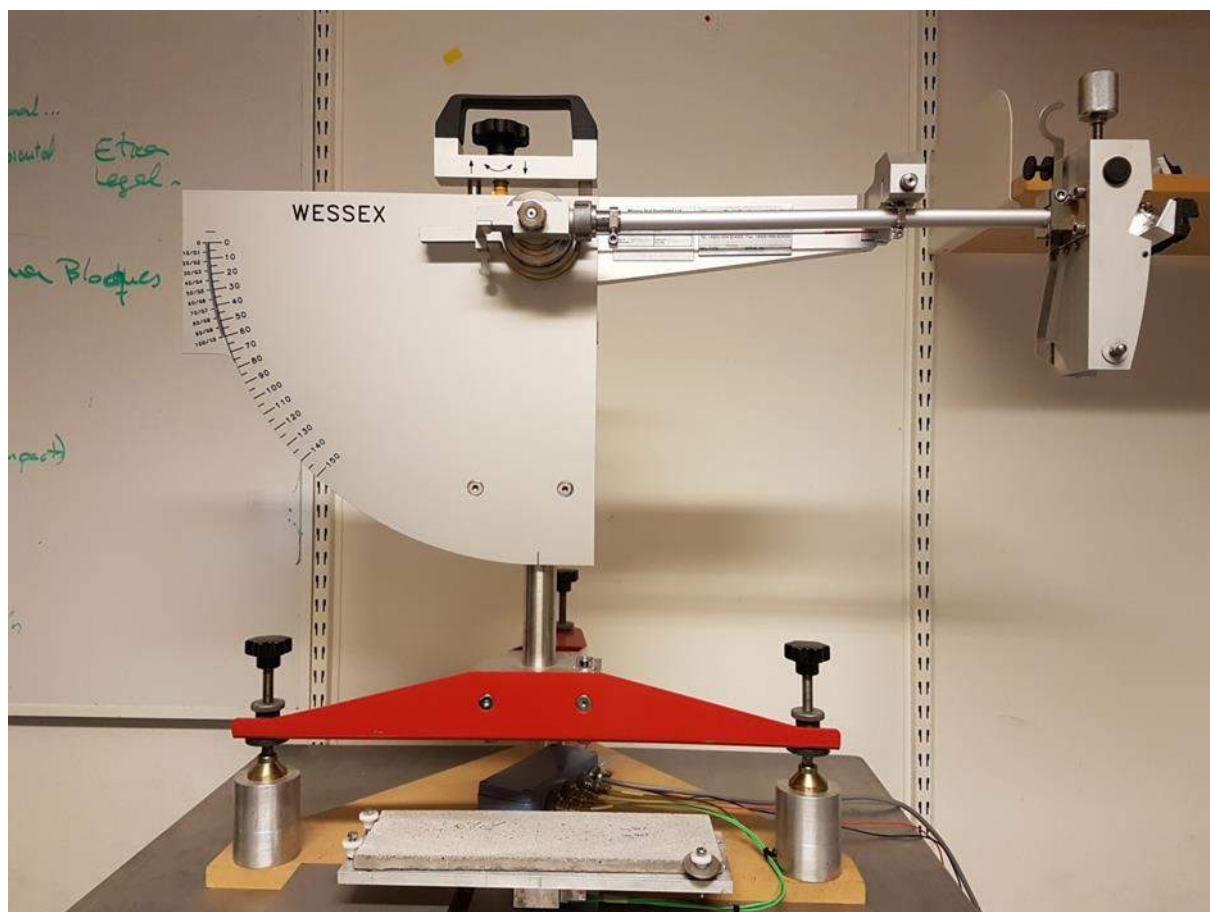
Pinnprovskroppen i pinne-på-skivamaskinen representerar bildäcket och består av en $20 \times 20 \text{ mm}^2$ kvadratisk däckprov med en dubb. Figur 5 visar ett fotografi över en däckprovskropp. Däckprovskropparna tillverkades genom vattenskrining av bildäck. Vägprovskroppen av betong var en rektangulär platta som sågats till storleken $80 \times 80 \times 15 \text{ mm}^3$. Den monterades på pinne-på-skivamaskinens rotor med ett skruvförband. En vikt användes för att trycka däckprovskroppen mot vägprovskroppen. Friktionsradien var mellan 35 och 45 mm, alltså avståndet mellan rotoraxeln och däckprovskroppens mittpunkt. Figur 6 visar ett fotografi över pinne-på-skivamaskinen med en däckprovskropp och en vägprovskropp påmonterad. Skivan roteras med en varvtalsstyrd elektrisk motor. Friktionskraften mättes med en lastcell och nötningsen mättes genom att väga provkropparna före och efter prov. Vid prov med dubbar, så orienterades dubben så att den breda delen var vinkelrät mot glidriktningen, som i en normal däck-vägbankontakt.

Provkropparna av betong i pendelproven hade sågats till rektangulära plattor $180 \times 80 \times 15 \text{ mm}^3$ mot en rektangulär dubbdäcksprovskropp $80 \times 25 \text{ mm}^2$ med två dubbar. Dubbdäcksprovskroppen var utskuren med hjälp av vattenjet och dubben var orienterad så att den breda delen var vinkelrät mot glidriktningen. Pendelprovaren kommer från Wessex Test Equipment och används normalt för att studera halka på vägbankor. Pendelproven illustreras schematiskt i Figur 7. Steg 1: pendelarmen frigörs. Steg 2: dubbdäcksprovet går i kontakt med vägprovet. Steg 3: dubbdäcksprovet lämnar vägprovet efter en glidsträcka om 120 mm.

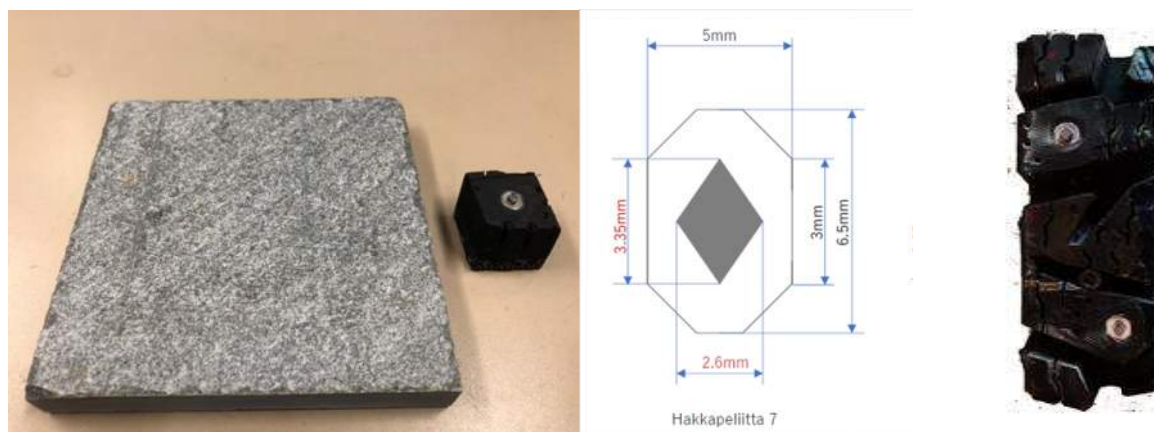
Prall är en metod som framförallt mäter utmattning av materialet genom stötförlopp. Prall saknar den abrasiva nötningsen som orsakas av dubbens geometri, då en stålcula används i stället för en hårdmetallsdubb. Böhme ger en adhesiv - mild abrasiv nötningsen baserat på hårdhetskillnaden mellan provkropparna och vilket slipmedel man tillför i denna betonggolvsprovningssmetod. Även Böhme saknar helt den abrasiva nötningsen som ges av dubbens formfaktor.



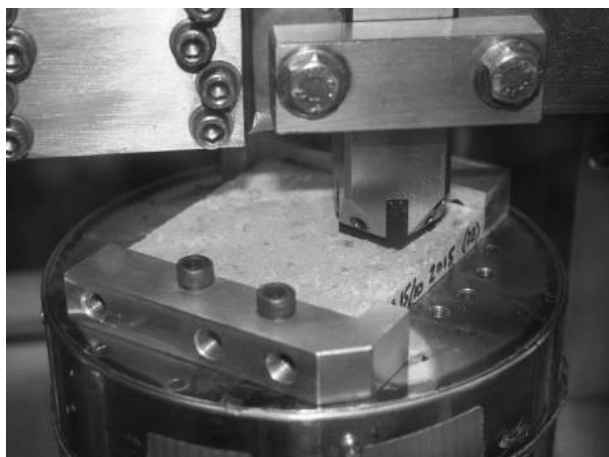
Figur.3. Skiss över pinne-på-skiva testriggen.



Figur 4. Foto över pendelprovsningsutrustningen med vägprovskropp och däckprovskropp påmonterad.



Figur 5. Till vänster: vägmaterielsprovskropp av sten och däckprovskroppar inför prov i pinne-på-skivamaskinen. Mitten: skiss över den provade dubbgeometrin. Till höger: däckprovskropp inför prov i pendelmaskin.



Figur.6. *Provuppställning med betongprovskropp monterad som skiva och dubbdäck monterad som pinne.*

Däckprovskropparna kommer från Nokian Hakkapeliitta 7 däck, som var inkörda 500 km (se Figur 5). Provserien genomfördes med fyra prov per vägmateriel och provutrustning. För pinne-på skiva maskinen var totala glidsträcken 5 m, normallasten 60 N och glidhastigheten 0,1 m/s. I pendelmaskinen var glidsträcken 120 mm per slag och medelnormallasten under ett slag var 20 N. Totalt 50 slag utfördes på varje vägprovskropp.



Figur 7. *Schematisk beskrivning av pendelprov. Till vänster startläge för prov. Mitten dubbdäcksprov går i kontakt med vägprov. Till höger dubbdäcksprov lämnar vägprov.*

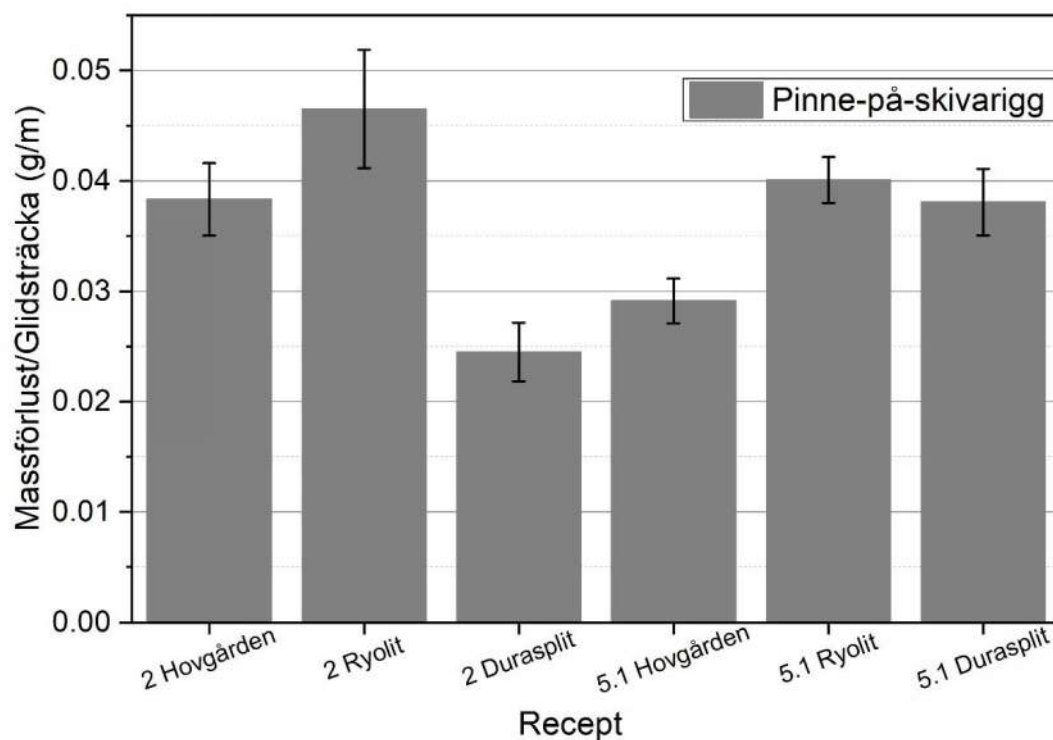
Före och efter provningarna vägdes provkropparna med en våg (Mettler Toledo XP20035, noggrannhet 1mg) för att mäta massan bortnött material. Innan vägning och innan prov i testutrustning, var provkropparna placerade i en klimatkammare med 50 % relativ luftfuktighet och en temperatur om 22 °C i 24 h. En hårdhetsmätare, Krautkrämer Dynamics, som mäter enligt LEEB hårdhetsvärde (HL), vilket är ett förhållande av rekylhastigheten och anslagshastigheten användes på betongprovskropparna. HL-värdet konverteras sedan till hårdhetsvärden enligt Vickers. Tio hårdhetsmätningar genomfördes på ballastdelen, och tio genomfördes på cementpastadelen. Hårdhetsmätaren kalibrerades med en hårdhetsnormal före och efter mätning, och avvikelser från hårdhetsnormalen av stål var 3 HV i medelvärde på 10 mätningar 3 HV.

Resultat

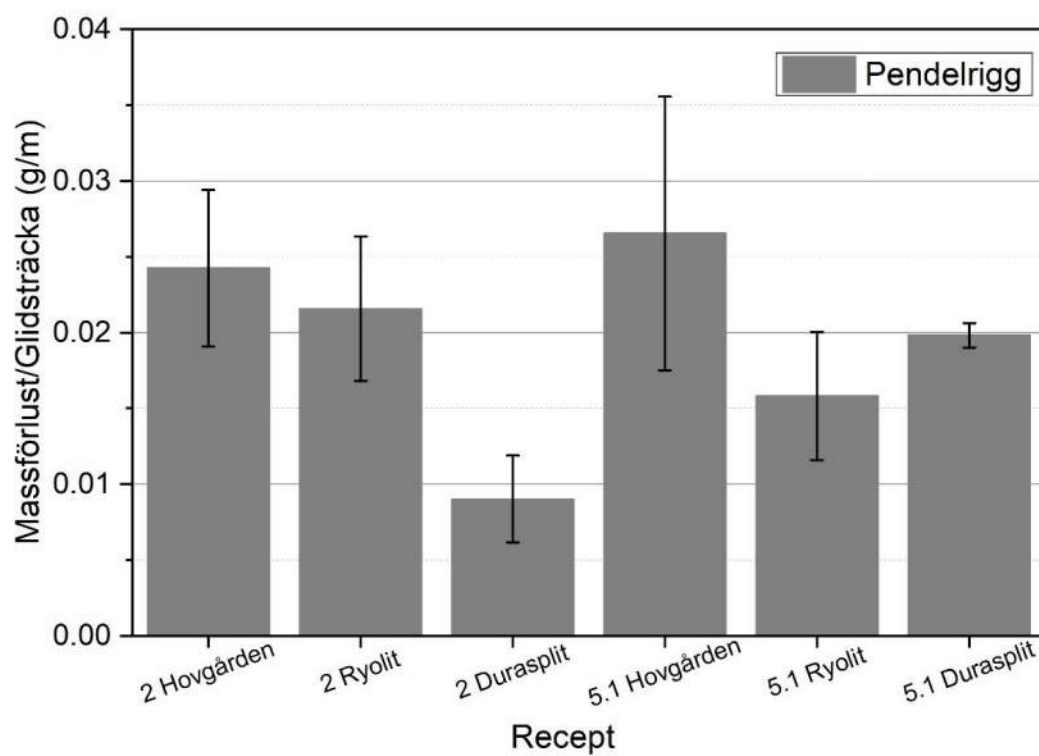
Figur 8 och 9 visar nötningen för respektive betongrecept i form av massförlust dividerat med sträcken som dubben har glidit mot materialet för pinne-på-skivaprov respektive pendelprov. Figur 10 visar hårdheten för respektive betongrecept i enheten Vickers. Jämför man Figureerna 8 och 9 ser man att nötningen visade lägst värde i båda testutrustningarna för Betong 2 Durasplit. Hårdhetsresultaten presenterade i Figur 10 visar ett likartat medelvärde för de olika stenmaterialens hårdhet vid parvis

jämförelse, med ballast av Durasplit som hårdast material. Figur 11 visar foton över de provade betongrecepten efter prov i pinne-på-skivamaskinen. På en del ytor syns spår efter dubbstiftets kontakt med vägmaterialets yta.

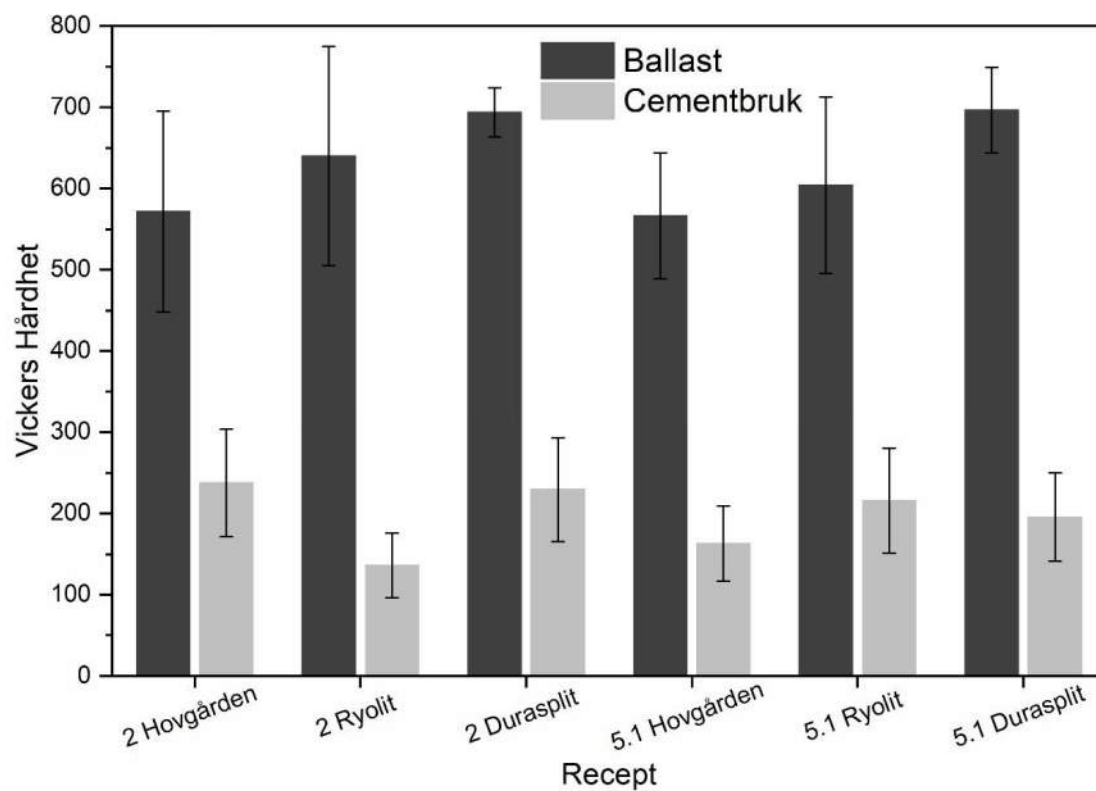
Figur 12 visar resultatet från provningen i Böhme och Figur 13 resultatet från provningen i Prall på de olika betongrecepten. Man kan notera att Prallproven och Böhme proven rankar vägmaterialets nötningsmotstånd annorlunda än resultaten från pinne-på-skiva- och pendelproven. Prov 2 Hovgården visar lägst nötning vid Böhme prov och för Prallprov visar prov 5.1 Ryolit lägst nötning.



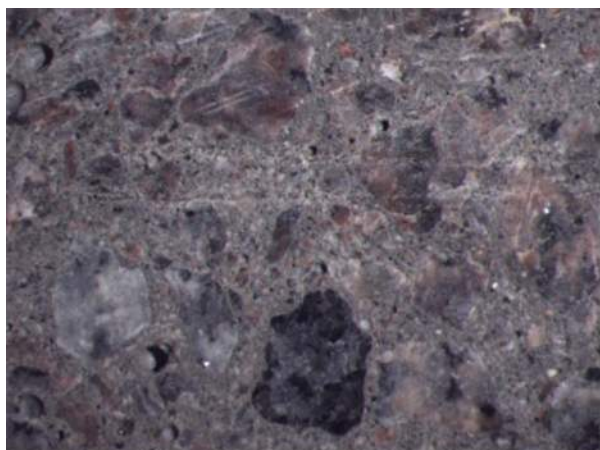
Figur 8. Nötningsresultat från pinne-på-skivaprovning



Figur 9. Nötningsresultat från pendelprovning



Figur 10. Resultat Hårdhetsmätning på ballast och cementbruk.



Betong 2 Hovgård



Betong 5.1 Hovgård



Betong 2 Durasplit



Betong 5.1 Durasplit

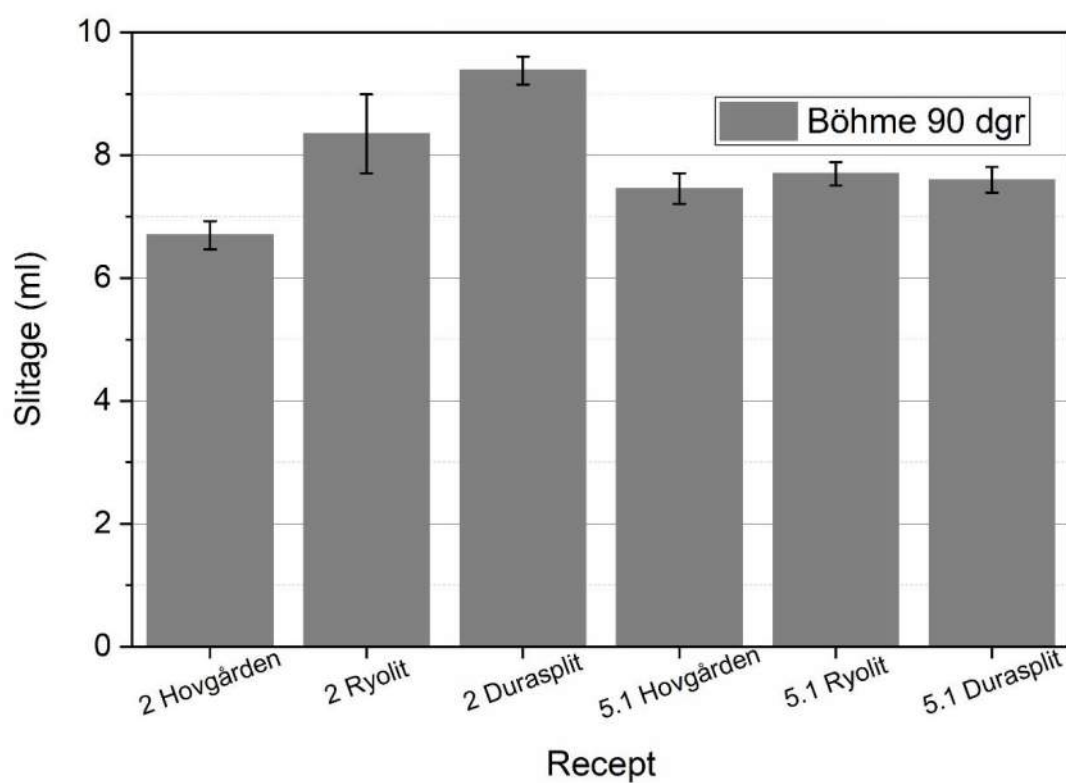


Betong 2 Ryolit

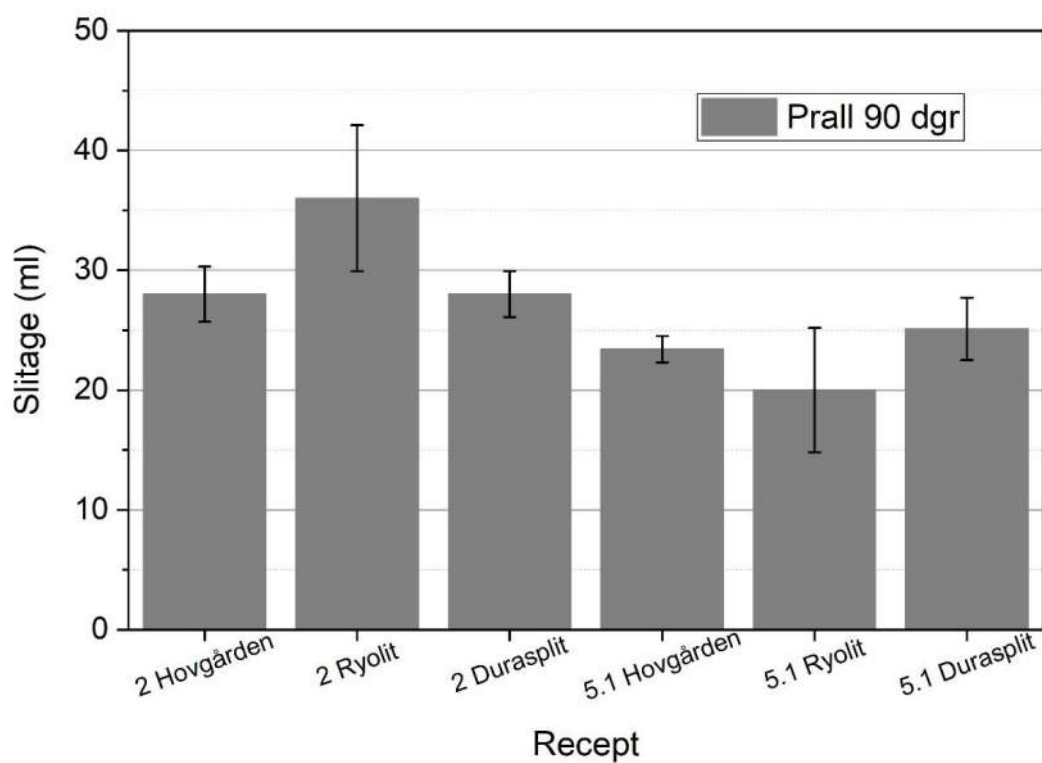


Betong 5.1 Ryolit

Figur 11. Fotografier av provade vägmateriälytor, storlek på avbildad yta 30 x 40 mm.



Figur 12. Resultat Böhmeprovning



Figur 13. Resultat Prallprovning

Diskussion

Tabell 2 presenterar hur vägmaterialet rankas i de olika provmetoderna efter tre månaders härdning. Rankningen är 1 – 6, där 1 är lägst uppmätt nötning och 6 är högst uppmätt nötning för respektive provmetod. Den uppmätta hårdheten rankas också 1 – 6, där 1 är högst och 6 är lägst uppmätt hårdhet. Av tabell 3 framgår att Pinne-på-skivaprov och pendelprov rankar på samma sätt som ballasthårdhet vad gäller det mest nötningsbeständiga materialet ”2 Durasplit”. För Prallprovningen visar ”5.1 Ryolit” lägst nötning och ”2 Durasplit” rankas som nummer fem vad gäller nötningsbeständighet. För Böhmeproven så visade resultaten att ”2 Hovgården” redovisade lägst nötning och ”2 Durasplit” rankas som nummer sex vad gäller nötningsbeständighet.

En sammanställning för de olika provningsmetoderna för utvärdering av dubbdäcksnötning av vägbeläggningar ges i Tabell 3. Pendelprovningen använder båda provkropparna som finns i kontakten mellan dubbdäck och vägbana, och simulerar båda två mekanismer som dokumenterats för dubbdäcksnötning av vägbana: glidande nötning och nötning orsakad av stötförlopp. Pinne-på-skivaprovningen använder också båda provkropparna från kontakten mellan vägbana och dubbdäck, men simulerar bara den glidande kontakten. Böhmeprovning använder en av provkropparna och en av nötningsmekanismerna i utvärderingen (vägmaterialet och glidande nötning). Prallprovningen använder också en av provkropparna och en av nötningsmekanismerna i utvärderingen (vägmaterialet och nötning orsakad av stötförlopp). Från ett systemperspektiv så brukar man rekommendera att använda provningsmetoder, som använder båda ytorna i kontakt, och som samtidigt påverkar med korrekta nötningsmekanismer [13].

Tabell 2. Rankning av resultaten från olika provmetoder efter tre månaders härdning av betongvägmaterialet.

	Prall 90	Böhme 90	Pinne-på-skiva	Pendel	Hårdhet (ballast)
2 Hovgården	4	1	4	5	5
2 Ryolit	6	5	6	4	3
2 Durasplit	5	6	1	1	1
5.1 Hovgården	2	2	2	2	6
5.1 Ryolit	1	4	5	5	4
5.1 Durasplit	3	3	3	3	2

Tabell 3. Laboratoriemetoder och dess användningsområden för utvärdering av olika nötningsprocesser i kontakt mellan dubbdäck och vägmateriäl.

	Prall	Böhme	Pinne-på-skiva	Pendel
Dynamisk nötning	x	-	-	x
Glidande nötning	-	x	x	x
Dubbdäck inkluderade dubb	- (stålkulor)	- (gjutjärnska)	x	x
Tillsatt slipmedel	-	x	-	-
Tillsatt vatten	x	x	ⁱ	ⁱ

i) Möjligt att variera mellan torr och våt nötning.

Enligt Rabinowicz nötningslag för abrasiv nötning [14] så är volymen avnött material invers proportionell mot hårdheten hos det hårdaste materialet i kontakten. Detta innebär att ju mindre hårdhetskillnad mellan provkropparna, desto mindre nötning. Jämför man Figurerna 8 och 9 med Figur 10 ser man att nötningen

visade lägst värde i båda testutrustningarna (pinne-på-skiva och pendel) för vägmateriäl ”2 Durasplit”. Stenen Durasplit är samtidigt den sten som visar högst värde på hårdhetsproven (Figur 10). Detta resultat, att hårdare sten leder till minskad nötning, är i överensstämmelse med tidigare resultat presenterade i [4] och [15]. Vägmateriäl ”5.1 Durasplit” uppvisar samma medelnivå på hårdheten som Betong 2 Dt men en högre nivå på nötningen trots en högre cementhalt och större sten. Dock är vct 0,03 enheter lägre och ballastvolymen över 5 % större i vägmateriäl ”2 Durasplit”. Fler variabler än ballastens hårdhet påverkar förmodligen också vägbetongmaterialets nötning såsom total ballastvolym, Dmax och vct. En annan viktig faktor är vidhäftning mellan cementpasta och ballast [16].

Slutsatser

Fyra olika metoder har använts för att utvärdera betongvägmateriäls nötningsbeständighet mot dubbdäck. Resultaten visar på följande slutsatser:

- De två provutrustningarna där både provkropparna i kontakten används (pinne-på-skiva och pendel) rankar betongvägmateriälerna nästan motsatt mot provmetoderna med bara en provkropp i kontakt (Prall och Böhme)
- resultaten visar att vägmateriålet med hårdast ballast visade en signifikant lägre nötning vid pinne-på-skiva- och pendelprovning, men fler variabler som såsom total ballastvolym, Dmax och vct, påverkar också vägmateriälets nötning.

Tack

Denna rapport är en delrapport inom det av Trafikverket finansierade BVFF projektet ”Hållbara betongvägar”. Författarna tackar projektdeltagarna: Niklas Johansson Cementa, Sten Hjelm, Cementa, Iad Saleh, NCC Teknik, Thomas Johansson Skanska, Roger Nilsson Skanska, Mats Gustafsson VTI, Ellen Dolk VTI, Åsa Laurell Lyne, Rise CBI Niklas Johansson Heidelbergcement, Björn Kullander Trafikverket, Johan Silwerbrand KTH, och Erik Simonsen Cementa för värdefulla synpunkter under projektet.

Referenser

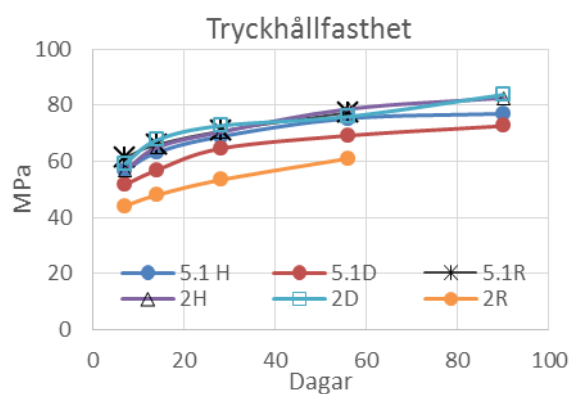
1. Vägverket, *Uppdrag att utreda möjliga åtgärder för att minska partikelemissionerna från slitage och uppvirvling från vägtrafiken*. Regeringsuppdrag 2006-06-21, 2006. N2006/4800 TP.
2. Jacobson, T., *Slitstarkare beläggningar för framtiden*. Trafikverket Workshop, 2013.
3. standard, E., *EN 12697-16:2016*, in *Bituminous Mixtures - Test Methods - Part 16: Abrasion by studded tyres (Prall)*. 2016, CEN: Brussels.
4. Olofsson, U., et al., *Nötning och luftburna partiklar från kontakten mellan dubbdäck och betongvägar – en laboratiestudie i en pinne-på-skiva maskin*. Institutionen för Maskinkonstruktion KTH, 2018. TRITA-MMK 2018:01.
5. Sánchez, G., *TEST DEVELOPMENT AND SIMULATION OF THE BRITISH PENDULUM TESTER FOR STUDED TIRES WEAR*. Maskinkonstruktion KTH, 2017. M. Sc. Thesis(MMK 2017:72): p. MKN 182.
6. Kozuka, R., *Studded tire wear - comparison between British Pendulum and Pin on disc testing*. Maskinkonstruktion KTH, 2017. M. Sc. Thesis(MMK 2017: MKN 188).
7. *SS-EN 1097-9*, in *Ballast – Mekaniska och fysikaliska egenskaper – Del 9: Bestämning av motstånd mot nötning av dubbdäck*. 2003, SIS: Stockholm.
8. *SS-EN 13982-3*, in *Methods of test for screed materials - Part 3: Determination of wear resistance - Böhme*. 2014, CEN: Brussels.
9. Gustafsson, M., L. Kraft, and U. Olofsson, *Moderna Betongbeläggningar - Utveckling mot mindre slitage och partikelemission*, in *VTI rapport 982*. 2019: VTI, Linköping. p. 96.

10. Snilsberg, B., et al., *Evaluation of different laboratory methods for simulation of pavement wear and road dust generation from studded tires*. Road Materials and Pavement Design, 2008. Volume 9 (Issue sep1: SPECIAL ISSUE ON ASPHALT TECHNOLOGY): p. 287-304.
11. *SS-EN 12390-3:2009*, in *Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens*. CEN: Brussels. p. 19.
12. *SS-EN 12390-6:2009*, in *Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens*. CEN: Brussels. p. 11.
13. Jacobson S och Hogmark S., *Tribologi - Friktion, smörjning och nötning*, Liber 1996.
14. Straffelini G., *Friction and wear - methodologies for design and control*, Springer 2015.
15. Olofsson, U. och Lyu Y., *Nötning och luftburna nötningspartiklar från kontakten mellan dubbdäck och betongvägar – en laboratiestudie av fem vägbetongblandningar och två stenmaterial i en pinne-på-skiva maskin* Institutionen för Maskinkonstruktion KTH, 2019. TRITA-ITM-RP 2019:1.
16. Peterson, Ö. and A. Johansson, *En undersökning av slitstark vägbetong med frilagd ballast*, in *CBI Uppdragsrapport 95093*. 1995, Swedish Cement and Concrete Research Institute: Stockholm.

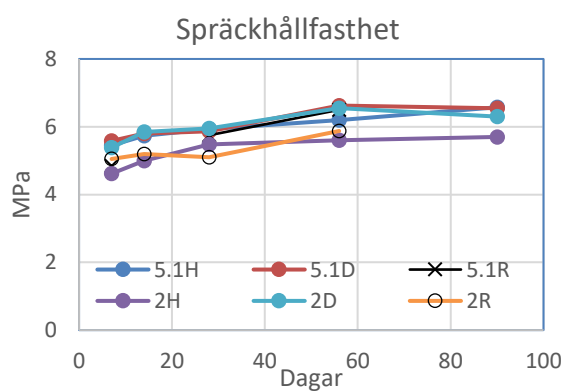
Appendix 1

Tabell 1.1 Kulkvarnsvärde N_A för ingående ballast.

Ballast (mm)	Kulkvarnsvärde
Hovgården 8-11	5,1
Hovgården 11-16	6,3
Durasplit 8-11	6 – 7
Durasplit 11-16	6 – 7
Ryolit 8-11	4,5
Ryolit 11-16	4,5



Figur A1,1. Tryckhållfasthet



Figur A1,2. Spräckhållfasthet.

Bilaga D: Fullskaletester i VTI:s provvägsmaskin

Mats Gustafsson, VTI

2020-09-08

Inledning

I delprojekt C har slitagetester utförts i VTI:s provvägsmaskin (PVM), se Figur 1. Provpaltor för PVM tillverkades på Cementa Research i Slite. Totalt blandades sju recept. Samtliga blandningar utfördes med lågt vct och luftinblandning för att klara exponeringsklasser XD3/XF4. Tillverkade plattor transporterades till VTI för montering i PVM.

Provpaltor tillverkades utifrån följande sju recept, utvecklade i delprojekt B:

- 5C: Ett recept med bra Prall, utan silika och relativt högt vct.
- 7A: Referens med dåligt kulkvarnsvärde.
- 4H-2L: Ballast från Hovgården med luft och silika. Alt till Torphyttan. Bästa resultatet från Hovgården.
- 5H-2L: Ett av de bästa recepten map Prall.
- 5F-3L: Bra Prall värden (<20) med mkt lågt vct och mkt silika, samt stennmjöl.
- 5F-4L: Bästa resultatet map Prall, mindre partikelsprång med stennmjöl, moderat cementhalt.
- 5O: Amerikanskt recept med ok Prallvärde, relativt god arbetbarhet, få partikelsprång, ingen silika och relativt låg cementhalt.

VTI:s provvägsmaskin är en utrustning som kan användas för att studera slitage och partikelemissioner som bildas i interaktionen mellan däck och vägbana. Provvägsmaskinen består av en cirkelrund 0,5 m bred och 15 meter lång som kan beläggas med valfri vägbeläggning. Maskinen roterar kring en centralt placerad vertikal axel på vilken sex hjulaxlar är monterade. På dessa kan olika typer av däck monteras. Fyra av axlarna är i drift och drivs av elmotorer. Vid provning sänks hjulen ner mot banan till önskat axeltryck och hjulen driver sedan maskinen att rotera. Hastigheten kan varieras steglöst upp till 70 km/h. I hastigheter över 30 km/h kopplas en excenterrörelse in vilket gör att hjulen inte kör i samma spår utan rör sig över nästan hela banbredden.

Hallen som maskinen står i kan kylas ner till under 0°C (beroende på årstid) och luftfuktigheten kan regleras. Beläggningarna som ska testas körs normalt först in. Inkörning av beläggningen innebär att det ytliga skiktet slits bort med hjälp av dubbdäckskörning under vattenbegjutning av banan enligt ett standardförfarande. Detta görs för att frilägga stenmaterialet så att belägningsytan är mer lik en normalt sliten beläggning. Standardinkörning innebär ca 20 000–30 000 varv i 70 km/h.



Figur 1. VTI:s provvägsmaskin (PVM).

Slitagetester metodik

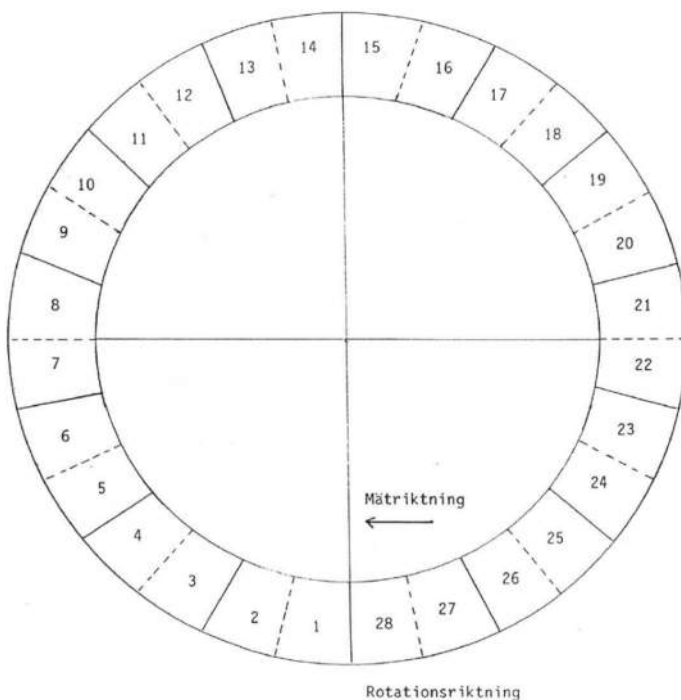
Provvägsmaskinen körs i 70 km/h i temperaturer strax under 0 °C, för att simulera vinterförhållanden. Dubbdäcken som används i detta test är Nokian Nordman 7 med dimensionen 205/55 R16 med 127 dubbar per däck. Var 30 000^{de} varv stannas maskinen och slitaget mäts på samtliga plattor med laserbalk, som mäter i en diagonal profil på varje platta. Dubbutsticket mäts på ett urval av 10 dubbar på varje däck. Första slitageomgången körs torr, därefter varannan med vattenbegjutning.

Då den första omgången däck tappade en del dubb, ersattes denna efter 150 000 varv med en mindre sliten uppsättning av samma däckmodell, inköpt vid samma tillfälle som den första.



Figur 2 Dubbdäck av modell Nokian Nordman 7, som användes vid testerna.

För att få lika mycket data från alla provade recept valdes att bygga fyra plattor av de sju nämnda recepten ovan. I Figur 4 visas belägningsplattornas numrering i PVM och i Tabell 1 hur plattorna placerades. Placeringen baseras på receptens Prall-värden och har ordnats så att slitstyrkan ska förändras gradvis runt ringen. Detta för att minimera risken för att stora skillnader i slitstyrka ska orsaka plötsliga nivåskillnader efter en tids slitage, vilket kan resultera i hoppande däck, som i sin tur kan skapa ojämnheter och skador på belägningsplattorna.



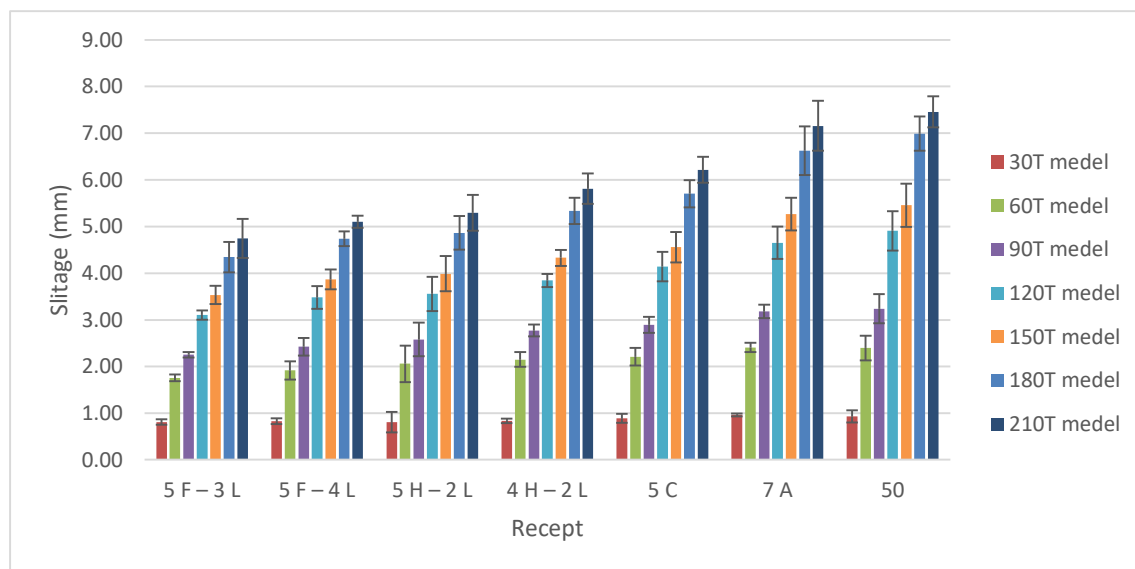
Figur 3 Beläggingsplattornas numrering i PVM

Tabell 1. Beläggingsplattornas placering i PVM.

Form nr	Form nr	Beläggingsbenämning	Prallvärde
1	2	5 F – 4 L	16,9
3	4	5 H – 2 L	18,9
5	6	5 F – 3 L	19,1
7	8	5 C	21,1
9	10	4 H – 2 L	22,0
11	12	5O	22,8
13	14	7A	30,6
15	16	7A	30,6
17	18	5O	22,8
19	20	4 H – 2 L	22,0
21	22	5 C	21,1
23	24	5 F – 3 L	19,1
25	26	5 H – 2 L	18,9
27	28	5 F – 4 L	16,9

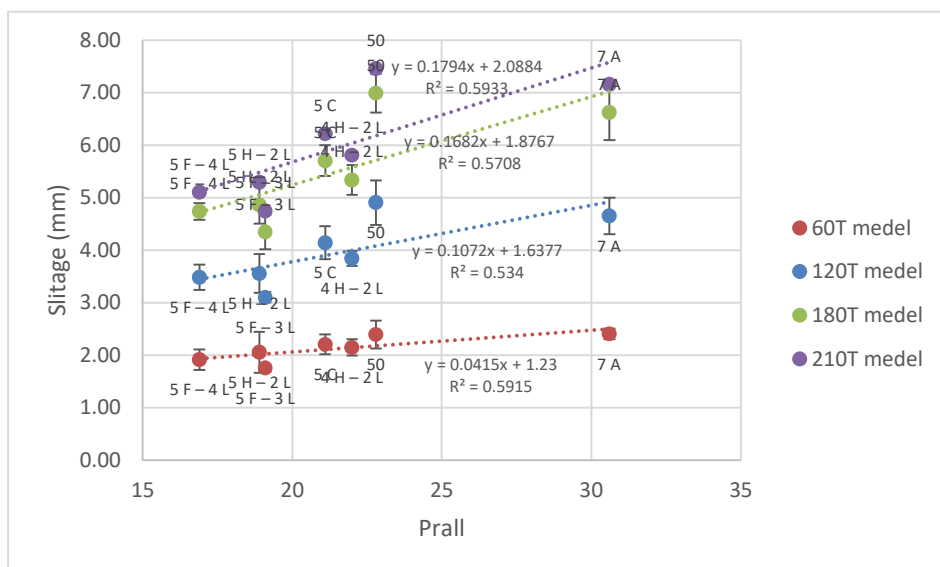
Resultat körningar med provvägsmaskinen

Förhållandet mellan de olika beläggningarnas slitagebenägenhet är oförändrat, dvs 5F-3L slits minst och referensen 7A och det amerikanska receptet 50 slits mest (Figur 4).



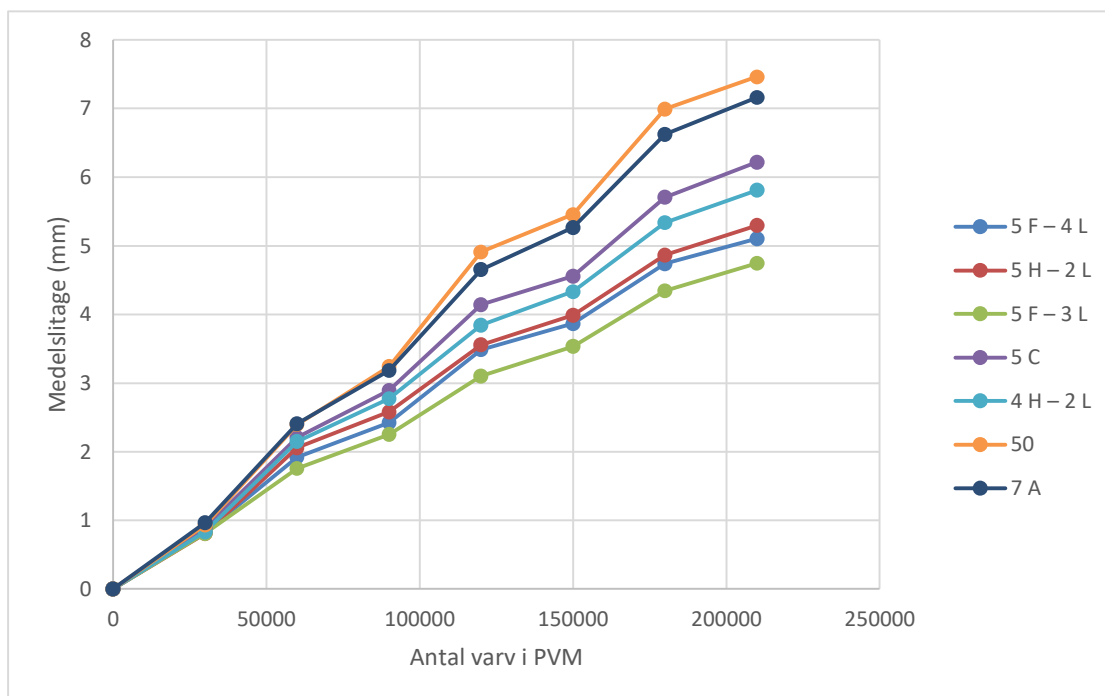
Figur 4 Medelslitage för 4 plattor med standardavvikelse sorterat i storleksordning.

Relationen till Prall-värdena håller i sig även efter 210 000 varv. Fortsatt är det recept 50, som trots hyfsat Prall-värde, avviker mest från regressionslinjen (Figur 5).

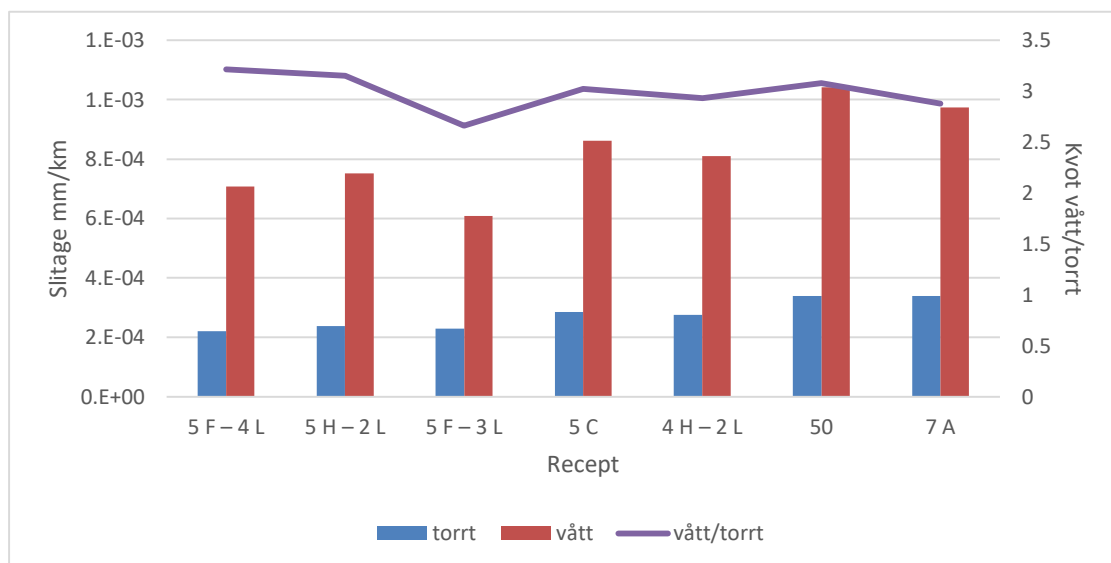


Figur 5 Medelslitage som funktion av Prall-värde efter 60 000, 120 000, 180 000 och 210 000 varv.

Slitagekurvan visar fortsatt omväxlande snabbare och långsammare slitage vid torra och våta cykler i PVM (Figur 6). I Figur 7 har medelslitaget i mm/km vid torra och våta cykler beräknats. Våtslitaget varierar mer än torrslitaget. Kvoten är något lägre för det bäst presterande receptet 5F-3L, främst beroende på att våtslitaget är lägre än för övriga recept.

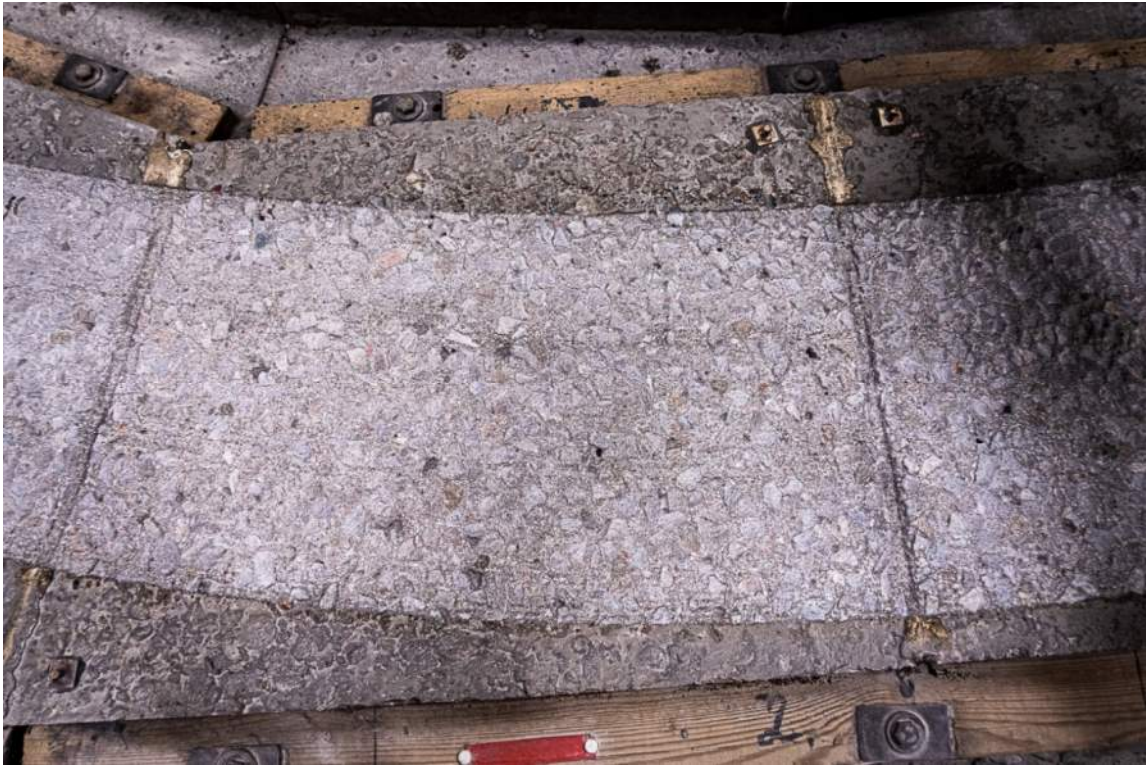


Figur 6 Medelslitageutveckling efter 210 000 varv.



Figur 7 Medelslitage i mm/km samt kvot mellan medelslitage under torra och våta slitageomgångar i PVM.

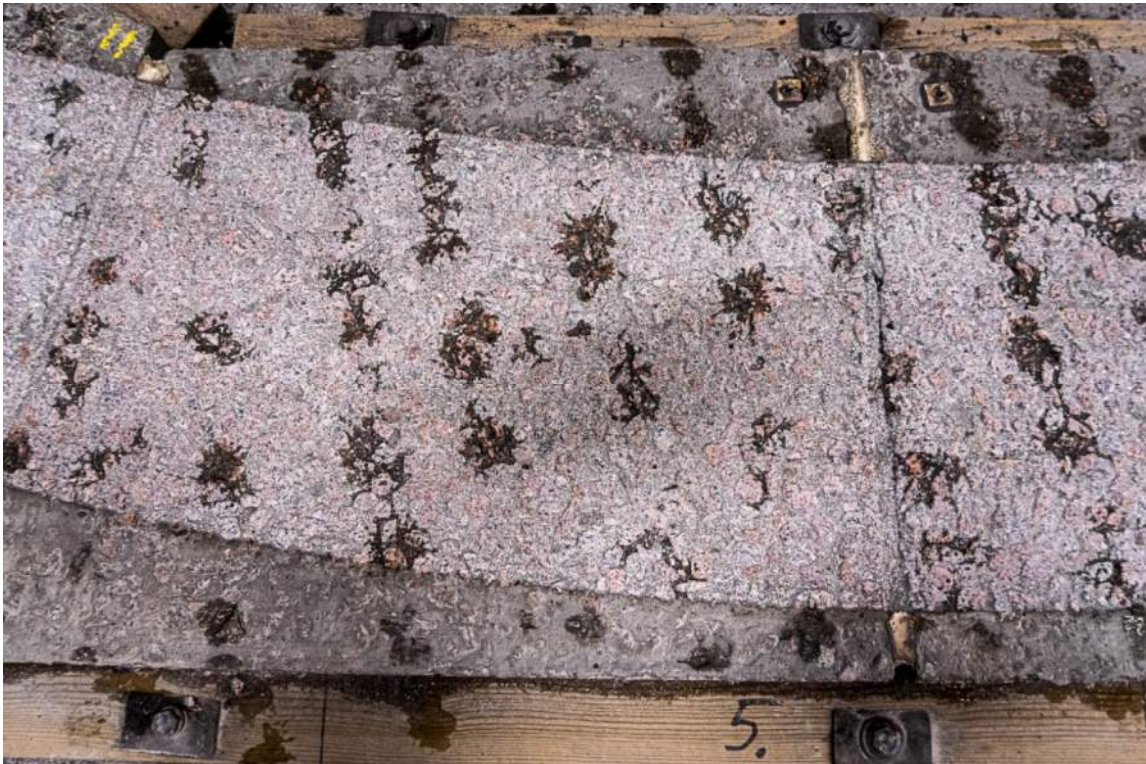
Några bilder på plattorna efter 120 000 varv



Figur 8 5F-4L



Figur 9 5H-2L (fläckar är kondensdropp från taket)



Figur 10 5F-3L (fläckar är kondensdropp från taket)



Figur 11 5C



Figur 12 4H-2L



Figur 13 50



Figur 14 7A

Diskussion och slutsats

Då förhållandet mellan beläggningarna är detsamma och ingen avvikande trend kan noteras avbryts testerna efter 210 000 varv och fokus läggs på att korrigera för dubbens förändringar för att, om möjligt, jämföra resultaten med tidigare tester.

Utifrån testerna kan dras slutsatserna att:

- Massa 5F-4H, 5H-2L och 5F-3L är ungefär lika slitstarka och bättre än 4H-2L och 5C, dessutom ännu bättre än 5O och 7A vid torr bana.
- Massa 5F-4H, 5H-2L och 5F-3L är bättre än 4H-2L och 5C, dessutom ännu bättre än 5O och 7A, när det gäller avnötning vid våt bana och även i genomsnitt.
- Massa 5F-3L är dessutom bättre än 5F-4H och 5H-2L när det gäller avnötning vid våt bana.

Resultaten från testerna i PVM visar att slitaget på samtliga beläggningar är 2–2,5 gånger högre under våta förhållanden än under torra.

Korrelationen mellan slitaget och receptens Prallvärden är hög vid torra förhållanden ($R^2=0,74$) och medelhög vid våta ($R^2=0,49$). Det kan noteras att receptet 5F-3L genomgående har lägst slitage trots endast tredje lägsta Prallvärde.

Två material som provats i ett tidigare projekt kunde jämföras med resultaten från föreliggande projekt. Ett av dem hade under våta förhållanden nästan lika lågt slitage som det bästa receptet i föreliggande studie, medan båda hade högre slitage än fem av de sju nya recepten vid torr vägbana.

Bilaga E: Underhåll och Reparationsmetoder

Roger Nilsson, Skanska Sverige AB

Iad Saleh, NCC Sverige AB

Henrik Bjurström, VTI

Björn Kullander, Trafikverket

2022-03-28

Innehåll

1. Inledning.....	3
1.1. Bakgrund.....	3
2. Funktionella egenskaper Skadetyper, skadeinventering	4
3. Sammanställning av underhålls- och reparationsåtgärder	7
4. Studiebesök England & USA	13
4.1 Studiebesök i England, tester på M1	13
4.2 Studiebesök i USA, slipning (NGCS) på US290 utanför Huston	15
4.3 Studiebesök, Golden Triangle Construction, Pennsylvania, USA.....	23
5. Slutsatser	25
6. Referenser	26

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Nedbrytning av vägöverbyggnader orsakas främst av yttre trafiklaster samt klimateffekter. I Sverige tillåts bland världens högsta fordonsvikter, BK4 (74t). Vidare tillåts dubbade vinterdäck som sliter på vägbanan och genererar vägpartiklar. Perioder med låga temperaturer kan orsaka tjällyft i undergrundsmaterial under särskilda förutsättningar. Vidare kan b.l.a. salt som används vid vinterunderhåll bidra till en snabbare nedbrytning av vägmateriäl.

Effekten av dessa faktorer hanteras genom att beakta erforderlig dimensionering, val av ingående material & sammansättning, rätt utförande samt lämpliga underhålls- och reparationsåtgärder i rätt tid.

En förutsättning för att erhålla en kostnadseffektiv betongväg med lång livslängd är att alla nedanstående delar kan värderas och hanteras:

- Erforderlig dimensionering
- Val av ingående material & sammansättning
- Rätt utförande
- Lämpliga underhålls- och reparationsåtgärder i rätt tid

Korrekt dimensionering hanteras genom att beakta relevanta förutsättningar under vägens dimensionerande livslängd så att överbyggnaden kan erbjuda en trafiksäker och jämn vägyta för rådande trafiklaster ($\text{ÅDT}_{t,k}$), tillgängliga överbyggnadsmaterial, typ av undergrund, klimateffekter mm. En fullgod dimensionering är grunden till att uppnå en lång livslängd. Värt att notera är att de yttre förutsättningarna är samma för en specifik väg förutom val av vägbyggnadsmaterial.

Val av ingående material och sammansättning hanteras genom att välja rätt material och recept som klarar av kritiska påkänningar i överbyggnaden samt övrig påverkan utan att nedbrytas under avsedd livslängd. Om fel material väljs kommer överbyggnaden inte att prestera som tänkt med kortare livslängd och ökade underhålls- och reparationskostnader. Oavsett vilka material som väljs i överbyggnaden måste de kunna hantera avsedda laster samt rådande förutsättningarna i den avsedda miljön (vägsalt, tjäle, etcetera).

För att avsedd funktion skall erhållas måste utförandet ske på ett korrekt sätt under rätt förutsättningar. Ett undermåligt utförande bidrar till accelererande nedbrytning och kortare livslängd.

Alla material och överbyggnader bryts ner över tid och behöver underhållas och repareras för att erhålla en kostnadseffektiv, hållbar samt förväntad livslängd. Det är även viktigt att lämpad underhålls- eller reparationsåtgärd sätts in i rätt tid. En förutsättning för att kunna välja rätt åtgärd i rätt tid är att förstå överbyggnadens tillstånd samt orsaken till nedbrytningen (dvs. observerad skada).

Genom att hantera och beakta dessa fyra delar (dvs dimensionering, materialval, utförande och underhålls- och reparationsåtgärder) skapas förutsättning för en hållbar och kostnadseffektiv betongväg med förväntad livslängd. Om någon av dessa delar inte kan realiseras kommer vägens funktionella och strukturella egenskaper inte att uppnås och kräva omfattande underhåll och reparationer (tex. bärighet, jämnhet, hjulspår, slitstyrka, friktion, partikel- och bulleremissioner).

Överbyggnadens livslängd innan större åtgärd definieras alltid av den nedbrytning som sker först. I en ideal situation bör en överbyggnad dimensioneras så att alla delar bryts ner samtidigt. I normalfallet eftersträvas att skador uppkommer i den övre delen av överbyggnaden som relativt enkelt kan åtgärdas.

I Sverige är slitage från dubbdäck en av den vanligaste nedbrytningen som måste beaktas. Dubbarna nöter bort beläggningen och orsakar på sikt hjulspår (slitagespår). Hjulspår ökar risken för vattenplaning och trigger ofta behov av åtgärd, framför allt på det högtrafikerade vägnätet. För det lågtrafikerade

vägnätet är de även materialrelaterade problem orsakade av klimateffekter (tex. åldring, fukt/vatten mm.) som föranleder åtgärder.

Dubbdäcksslitage orsakar samtidigt att beläggningssmaterial nöts bort och orsakar samtidigt skadliga vägp Partiklar. Slitage inverkar även på friktion, textur samt bulleremissioner.

För asfaltbeläggningar är det totala spårbildningen summan av nötning av dubbdäck samt plastiska deformationer i asfaltmaterialen samt eventuella deformationer i undergrunden. För betongvägar består spårbildningen främst av nötning. Betongvägar bör således kunna erhålla en lägre total spårbildning om andra faktorer är konstanta (exempelvis val av samma slitagesten i slitlager).

Det är väsentligt att uppkomna skador kan repareras samt att drift och underhållsåtgärder kan utföras på ett säkert, snabbt och effektivt sätt så att hög tillgänglighet med få och korta avstängningar kan erhållas.

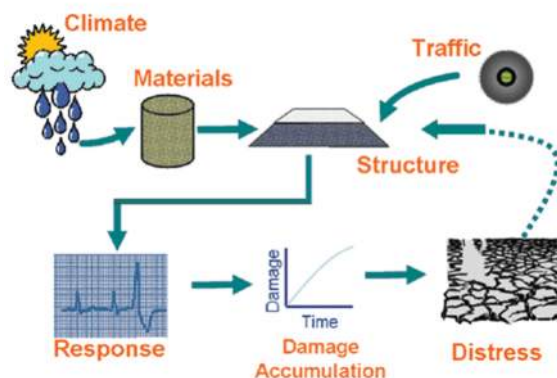
I kapitel 2 beskrivs relevanta funktionella egenskaper för en väg samt exempel på nedbrytning, skadeorsaker, skadeinventering samt utvärderingsmetoder.

I kapitel 3 ges en sammanställning av skadetyper samt relevanta underhålls- samt reparationsmetoder utifrån nyligen publicerade erfarenheter.

I kapitel 4 redovisas erfarenheter från studiebesök i England och USA där olika försök att återställa ytjämnhet, friktion samt bulleremissioner pågår. Speciellt fokus på reparation av hjulspår (slitagespår) behandlas/presenteras.

2. Funktionella egenskaper Skadetyper, skadeinventering

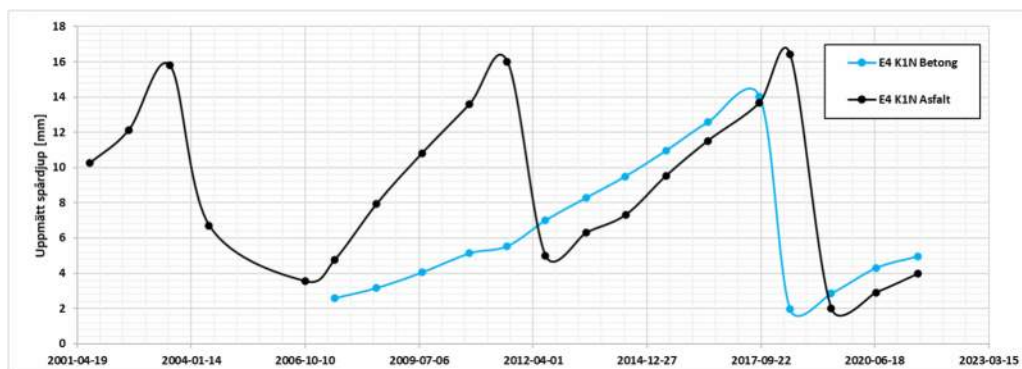
För att förstå hur en väg bryts ner samt kunna definiera överbyggnadens tillstånd samt prognostisering av nedbrytningen krävs kunskap om påverkande faktorer (ex. klimat, materialegenskaper, trafik, överbyggnadstyp m.fl.), påkänningar i överbyggnaden, nedbrytningssamband, etcetera. Vidare bör de olika faktorernas variation över tid beaktas. Det är således intill omöjligt att beakta alla faktorer utan att förenkla och generalisera. Det viktiga är att identifiera och beakta de mest relevanta faktorerna. I *Figur 1* visas ett överskådligt samband om hur en vägöverbyggnad bryts ner samt hur nedbrytningen kan beaktas.



Figur 1 Schematisk bild av påverkande faktorer och nedbrytningssamband

Genom att inventera vanligt förekommande vägsador erhålls en första indikation om relevanta nedbrytningstyper. Trafikverket gör regelbundet vägytemätningar för att inventera tillståndet på vägarna. Resultatet från dessa mätningar går att studera i PMSv3 (<https://pmsv3.trafikverket.se>). I databas finns mätdata över flera år dokumenterade så analyser över nedbrytningsförlopp kan enkelt tas fram.

Nedan ges ett exempelresultat på spårutvecklingen för E4:an förbi Uppsala (del med betong- samt asfaltöverbyggnad) samt IRI-utveckling på betongvägen, se Figur 2, 3, 4 och 5.

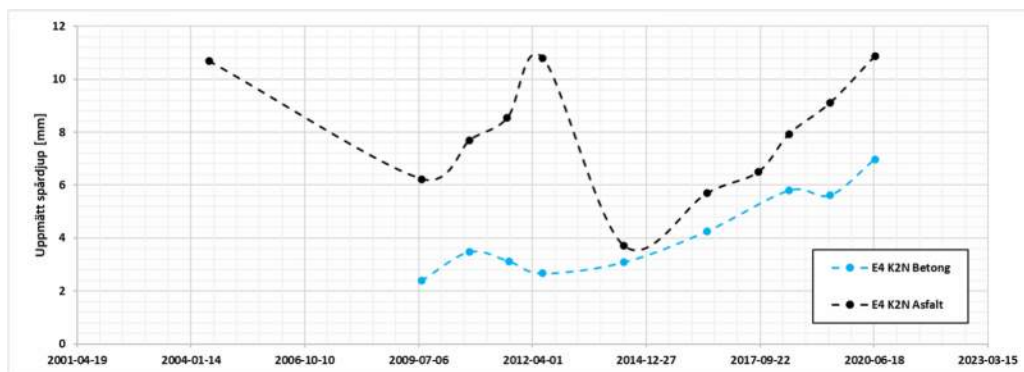


Figur 2 Spårutveckling på E4 förbi Uppsala (K1N, Betong/Asfalt)

Spårutvecklingen för asfaltöverbyggnaden ges av den svarta heldragna linjen. Spårutvecklingen är i snitt ca 2,5 mm per år vilket ger behov av omtoppning vart 5-6:e år. Spårutvecklingen för betongvägen ges av den blå linjen och är ca 1,1 mm per år, vilket ger behov av spårlagning vart 10:e år inräknat ett initialspår om ca 2 mm. I detta exempel har betongbeläggningen drygt dubbelt så lång livslängd med avseende på spår djup. Den sista delen av den blå linjen avser spårutveckling av asfalt (betongytan överlagd med asfalt)

Figur 3 visar spårutvecklingen för K2 i norrgående riktning. Eftersom det går färre fordon i K2:an förväntas mindre hjulspår vilket bekräftas av resultat från mätningarna. Det kan noteras att även för detta körfält är spårutvecklingen lägre för betongvägen om än skillnaden är lägre. Spårutvecklingen för betongen är i snitt ca 1 mm per år och ca 1,3 mm per år för asfaltbeläggningen.

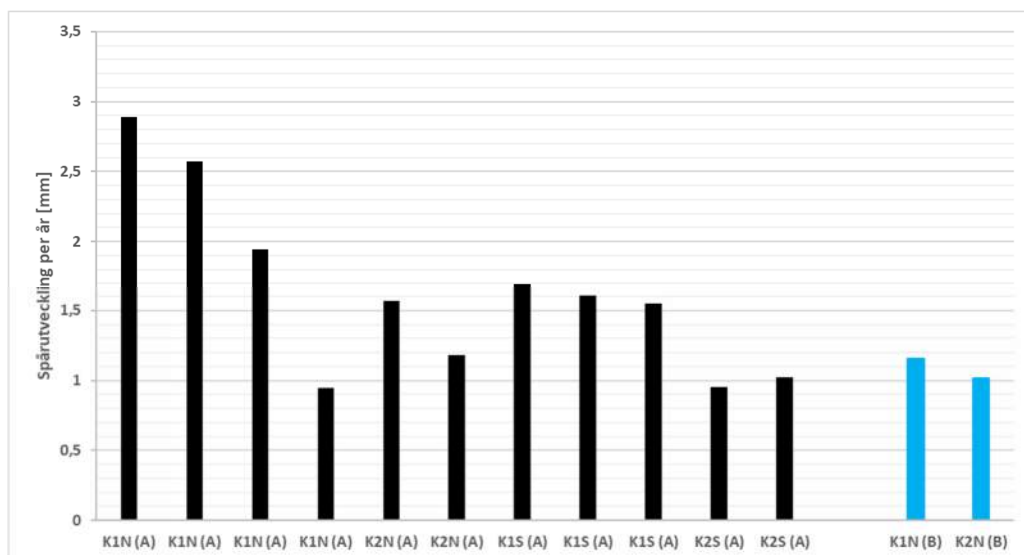
Värt att notera är att i betongen användes en blandning av slitagesten med olika egenskaper för att klara krav på kkv9 och för asfalten användes en sten som uppfyller krav om kkv 6. Om samma slitagsten (kkv6) använts till betongen hade skillnaden i spårutvecklingen varit ännu större. En orsak till detta är att betong inte har något tillskott av permanenta deformationer.



Figur 3 Spårutveckling på E4 förbi Uppsala (K2N, Betong/Asfalt)

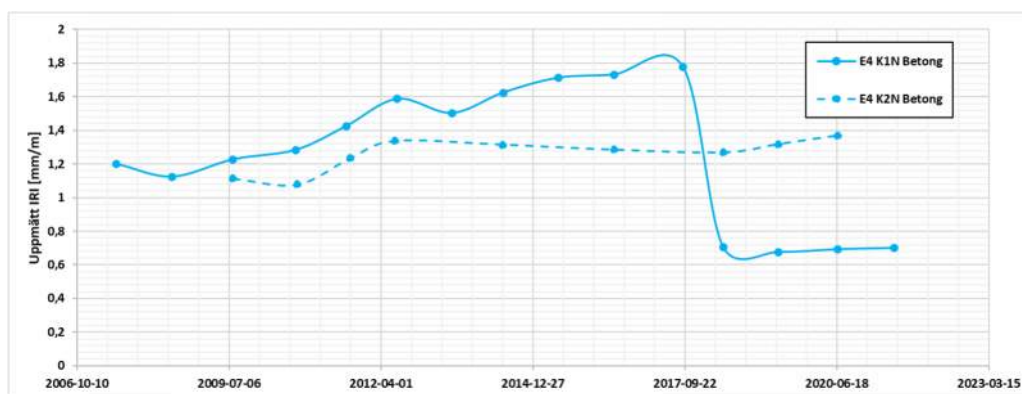
En sammanställning av spårutveckling för per år för betong och asfaltsträckan förbi Uppsala presenteras i Figur 4. K1 och K2 anger körfält och S och N anger riktning, (A) och (B) anger asfalt- och betongsträcka.

Det är tydligt att största spårutveckling sker i K1. Spårutvecklingen för valda sträckor är något större i norrgående riktning. Skillnaden är större mellan K1 och K2 för asfalten vilket kan förklaras av tillskott i spår från de permanenta deformationerna trots att en högkvalitativ sten (kkv6) används för asfaltbeläggningen.



Figur 4 Spårutveckling per år på E4 förbi Uppsala (Betong/Asfalt)

Figur 5 visar IRI-utvecklingen för betongvägen för K1 och K2. Ojämnheten är större för K1 vilket kan förklaras med de utvecklade hjulspåren som kan påverka IRI-värdet negativt. Det kan även noteras att överläggning med asfaltlager ger ett lägre IRI-värde.



Figur 5 IRI-utveckling på E4 förbi Uppsala (K1N/K2N, Betong)

Genom att analysera observerade nedbrytningar som tex spårdjup samt jämnhet kan prognosmodeller tas fram för att prediktera planerade underhålls- samt reparations åtgärder. Det är viktigt att beakta relevanta faktorer som påverkar tillståndsutvecklingen.

Nedan ges exempel på ett antal metoder och mätningar för att karakterisera vägytegenskaper:

- Visuellt inspektion
- Bärighetsmätning (FWD, Rullande bärighetsmätning)
- Georadarmätning (GPR för att lokalisera dymlingar och tjocklek)
- Seismisk mätning (materialegenskaper)
- Ojämnhet i längsled (IRI)
- Ojämnhet i tvärlid (spårdjup)
- Lutning i längsled (backighet)
- Lutning i tvärlid (tvärfall)

- Längsprofil
- Textur
- Friktion
- Polering
- Partikelemissioner
- Digitala stillbilder
- Vägytans utseende
- Längdmätning och positionering (GPS)
- Kurvatur
- Sprickor
- Övriga mått som kan beräknas på vägprofil
- Borrkärnor för att kunna utföra olika provningar i lab, som t ex:
 - Utmattningsegenskaper
 - Styvhetsmodul/Komplexmodul
 - Deformationsegenskaper
 - Tryckhållfasthet och densitet
 - Saltfrostegenskaper
 - Kloridinträngning
 - Luftporstruktur via ett s k planslip, vilken i sin tur säger något om luftporerna storlek och fördelning i provet.
 - Vct och eventuella skademekanismer via ett s k tunnslip

Genom att följa tillståndsutvecklingen över flera år kan nya oväntade effekter identifieras och beaktas (ex. förändrad trafik, klimateffekter, material etcetera). Denna kunskap kan användas till att öka förståelsen av underliggande faktorer som påverkar överbyggnadens nedbrytning samt observerade skador för att bättre kunna välja hållbara underhåll- och reparationsåtgärder. Det är även viktigt att sätta in åtgärder vid rätt tidpunkt för att optimera kostnader.

Tabell 1 ger en sammanställning av inspektioner/utvärderingar som utförs i England och USA.

3. Sammanställning av underhålls- och reparationsåtgärder

Under de senaste åren har ett antal manualer och guider uppdaterats och publicerats med erfarenheter och ”best practice” avseende underhåll- och reparation av betongöverbyggnader.

Nedan ges en sammanställning av underhålls- och reparationsåtgärder baserade på följande manualer och guider.

- Handbok – Drift, underhåll och reparation av betongvägar, VTI, 2014 [1]
- Concrete pavement preservation guide, FHWA, 2014 [2]
- Concrete pavement guide, Caltrans, 2015 [3]
- Concrete pavement maintenance manual, Highways England, 2021 [4]

Tanken är inte att nämna samtliga reparationsmetoder i detalj men att ge exempel på de vanligaste och viktigaste åtgärderna för högtrafikerade vägar.

Tabell 1. Typer av skador och möjliga underhålls- och reparationsåtgärder

Typ av skada	Möjlig skadeorsak	Underhållsåtgärd
Fogskada (fogmaterial)	- Dålig vidhäftning - Förlust av fogmaterial - Upptryckning av fogmassa - Otillräcklig elasticitet - Fel bredd på foglisten	- Omfogning med foglist - Omfogning med fogmassa
Fogskada (kanter)	- För tidig sågning - För sen sågning - Skador vid friläggning - Trafik med dubbdäck - Låsning i rörelsefog - Otillräcklig stöd under fogar - problem med dymlingar	- Ingen åtgärd (små skador) - Kantlagning (gjutning)
Fogskador (väggrensfog)	- Rörelse på grund av tjäle - Asfaltbeläggningen åldrad - Sättningar i vägrenen	- Tätas med bitumen och sand - Tätas med fogmassa - Omläggning av asfaltväggen
Vägmarkering (Vidhäftning)	- Bristfällig rengöring - Olämpligt material - Otillräcklig primning - Olämplig snöröjning - Felaktig tjocklek	Arbetsgång: 1. Borttagning gammal massa 2. Vattenfräsning 3. Primning 4. Påförande av ny massa
Låg friktion	- Undermålig mikro- & makrotextur	- Diamantslipning
Ojämnheter (sättningar)	- Deformation - Erosion av material - Otillräcklig dränering - Brist i styvhet i underbyggnad	- Lyftning av plattor - Byte av plattor, antingen via platsgjutning eller via prefab - Förbättring av dränering

	- Tjäle	
Ojämnheter (plattförskjutning)	- Erosion vid fogar	- Diamantslipning - Lyftning av plattor - Byte av plattor, antingen via platsgjutning eller via prefab
Ojämnheter (beläggningsytan)	- Ojämnt yt slitage	- Diamantslipning - Pågjutning
Pop-out (materialsläpp 10-50 mm), troligen pga olämpligt ballastmaterial	- Saltfrostavskalning - ASR - Ingjutna olämpliga material	Troligen ingen risk på kort tid, men på längre sikt kan åtgärder behövas vidtas, t ex: - Lokala reparationer - Tunna reparationer med cement- eller epoxibundet material
Hjulspår	- Dubbslitage - Undermåligt stenmaterial (lågt prall- / kulkvarnsvärde)	- Diamantslipning - Pågjutning
Yskador/ytavskalning	- Saltfrostavskalning - Icke korrekt finish och härdning vid produktion - Otillräckligt cementinnehåll / för högt vct t ex pga. vid produktion el. vid nederbörd - Otillräckligt luftinnehåll/ dålig luftporstruktur/ansamling av luftporer - Bränsle eller annan kemisk påverkan	- Återställning av textur - Tunn pågjutning - Djupare reparation - Reparation av hela tvärsnittet - Sektionsbyte - Pågjutning eller ombyggnad. Antingen med fräslåda eller med en fräsning med efterföljande pågjutning av asfalt (PMB) eller betong.
Ytskador/ythåligheter	- Stor uppsprickning - För lågt täckskikt - Konstruktionens livslängd överskriden	- Reparation över hela tjockleken/byte av tvärsnitt/sektion
Kompressionsskador	- Yttre påverkan av till exempel temperatur eventuellt i kombination med för litet avstånd i fogar - Konstruktionsfel	- Troligen krävs både reparation av hela tvärsnittet samt åtgärdande av underliggande material.

	- Tvång i fog - Otillräcklig vibrering av betong, otillräcklig vidhäftning mellan betonglager	
Oregelbundna sprickor	- Otillräcklig härdning, eller uttorkning mellan pallar vid gjutning/produktion - Uttorkad betong eller separerad betong - Alkalisilikareaktioner (ASR)	- Ytbehandling - Cement- eller epoxiinjektering - Ta bort skadad sektion och gjuts om (ASR)
Sprickor (längsgående)	- För sen fogsågning - Trafik för nära betongkant - Underdimensionerad - Fel läge på dymlingar - Sättningar	- Tätning av spricka - Förankring av spricka - Tunn pågjutning (armering) - Omgjutning av plattor
Sprickor (tvärgående)	- För sen fogsågning - underdimensionerad - Sättningar	- Tätning av spricka - Förankring av spricka - Tunn pågjutning (armering) - Omgjutning av platta
Sprickor (hörn)	- Trafik för nära betongkant - Underdimensionerad - Erosion av material	- Tätning av spricka - Förankring av spricka - Omgjutning av platta
Längsgående sprickor	- Bristfällig underbyggnad - Trafikbelastningar - Felkonstruktion - Utförande fel - Tvång i fogar	- Sprickreparation och tätning - Sektionsbyte - Djupare reparation och eventuellt byte/förstärkning av underbyggnad
Sprickor (blocksprickor)	- Underdimensionerad - Erosion av material - Livslängden är slut	- Omgjutning av plattor
Sprickor (vid dymlingar)	- Dymlingar är fel placerade - Instabila betongplattor - Felkonstruktion	- Ersätts med nya dymlingar - Underlaget stabiliseras
Många plattor	- Livslängden är slut	- Omgjutning av körfält

med sprickor		
Erosion av finmaterial (pumpning)	- Otäta fogar - Instängt vatten - Bristfällig dränering - Tätning av fogar	- Tätning av fogar - Stabilisering av plattor - Dränering

Sammanställningen indikerar på att det internationellt finns ett antal inarbetade och beprövade reparationsmetoder som potentiellt skulle kunna implementeras i Sverige för våra specifika förutsättningar som tex dubbdäcksslitage och tunga fordon.

Som tidigare nämnts eftersträvas effektiva och snabba underhålls- och reparationsåtgärder som minimerar trafikstörningar. Åtgärder bör om möjligt kunna utföras under natten för att trafiken skall kunna släppas på till morgonrusningen.

Exempel på snabba och effektiva åtgärder som bör kunna användas i Sverige innefattar till exempel, slipning/fräsning av betongytan samt byte av hela block med Prefabpaneler, se exempel nedan. På KTH pågår även forskning kring detta under ledning av prof. Johan Silfwerbrand.



Figur 6 Utbyte av prefabricerade betongvägsplattor [5]



Figur 7 Installation av hexagonala betongplattor [6]



Figur 8 Test av prefabricerade betongblock i Virginia och Colorado [6].

4. Studiebesök England & USA

För att studera nya och potentiella reparationsmetoder har studiebesök i England och USA genomförts. I England besöktes en teststräcka på M1 där olika metoder för att återställa ytegenskaper skall utvärderas. I USA besöktes ett projekt på väg US290 som skulle slipas enligt the Next Generation of Concrete Surfaces (NGCS) [7]. Vidare utfördes ett studiebesök hos Golden Triangle Construction, Pennsylvania, USA.

3.1 Studiebesök i England, tester på M1

Studiebesök vid utförande av provytor på M1 där fem olika åtgärder för att återställa funktionella vägytegenskaper (dvs. jämnhet, friktion, polering, textur, buller etcetera) skall undersökas. Ytan som skall återställas är en ca 40 år gammal ECP (exposed concrete pavement).

Följande åtgärder har utförts och kommer att utvärderas:

1. Longitudinell diamantslipning (LDG)
2. Finfräsning
3. Obehandlad sektion (kontrollsektion)
4. Tillämpning av ett Thin Surface Course System, 0/10, 35 mm (TSCS)
5. Tillämpning av ett Ultra-Thin Surface Course System (UTSCS), 0/6, 22 mm
6. Blästring

Sträckorna kommer att följas upp mellan september 2018 och december 2022. Vid studiebesöket utfördes slipning av en del av provsträckorna.

Resultaten förväntas att öka kunskapen om LCC/LCA kostnader etc.

Under 2021 har ytterligare en provsträcka utförts på M1 där slipning enligt NGCS skall testas.

Figur 9-12 illustrerar slippningsförsök på M1.



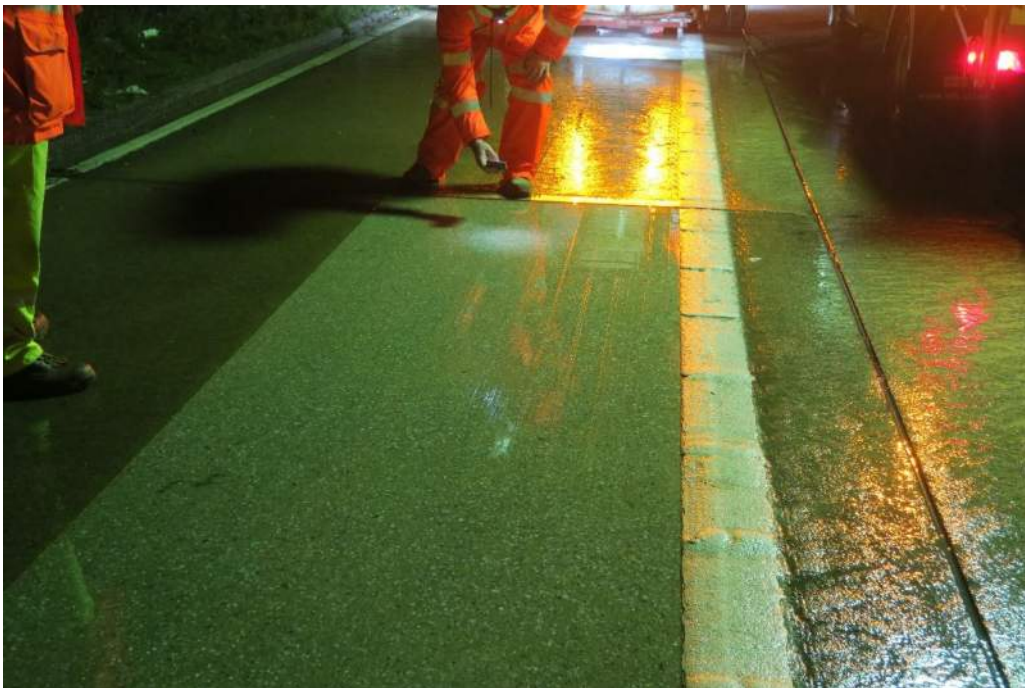
Figur 9 Studiebesök provsträcka på M1



Figur 10 Slipning del av M1



Figur 11 Resultat av slipning del av M1



Figur 12

4.1 Studiebesök i USA, slipning (NGCS) på US290 utanför Huston

För att studera slipning av betongvägar togs kontakt med The American Concrete Pavement Association (ACPA) som tog med oss på ett projekt utanför Huston där Harris County's U.S. 290 skulle slipas enligt the Next Generation of Concrete Surfaces (NGCS). NGCS är ett koncept som utvecklats av Purdu University. Syftet med NGCS var främst att minska däckbuller samt att återställa vägytans funktionella egenskaper. Försök med flera slipsteg testades för att erhålla en optimal negativ

ytttextur. Det nuvarande konceptet innefattar två slipningar. Första slipningen (planfräsning) har som uppgift att återställa ytans jämnhet samt friktion (ytråhet). Andra slipningen har som uppgift att skapa en längsgående negativ textur.

Figur 13–25 visar exempel på de olika momenten. Figur 14–16 visar exempel på de olika utrustningar som användes under slipningen. Figur 17 visar trumman med diamantsågblad som används i första steget (planfräsning). Sågbladen är ca 3 mm tjocka och sitter ca 0,9 mm avstånd mellan varandra. Figur 18 visar exempel på resultat av första slipningen. Figur 19 visar exempel på trumma som användes i andra steget. Det kan noteras att diamantsågbladen är separerade för att orsaka den negativa texturen. Tjocklek på sågbladen i andra steget är ca 2,5 mm och sitter med ett avstånd mellan 12–16 mm. Normalt är sågdjupet 3–5 mm. Figur 20 visar resultat efter första och andra slipningen. Figur 21–25 visar exempel på slutresultatet efter slipning. Bullerreduktion på några dB har uppmätts.

Slipning skulle potentiellt vara en snabb och effektiv underhållsåtgärd för att ta bort hjulspår. Slipning kan utföras under nattetid för att minimera störningar. Utveckling och optimering för svenska förutsättningar kommer sannolikt att behövas. En fråga att utreda är hur de olika slipningar klarar dubbdäckstrafik.



Figur 13



Figur 14



Figur 15



Figur 16



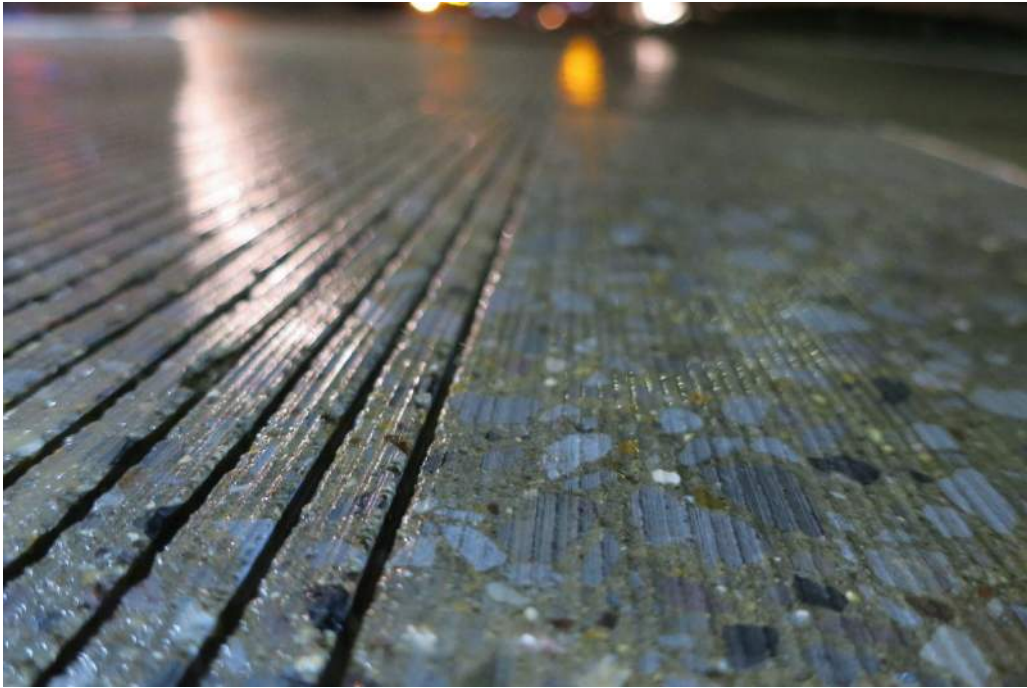
Figur 17



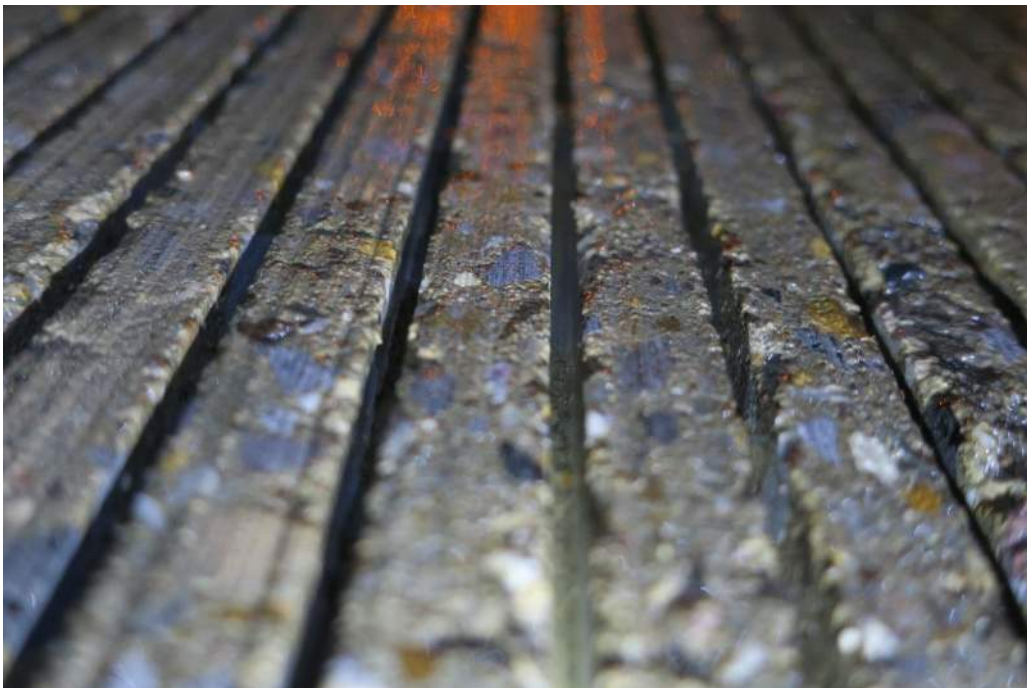
Figur 18



Figur 19



Figur 20



Figur 21



Figur 22



Figur 23



Figur 24



Figur 25

5.1 Studiebesök, Golden Triangle Construction, Pennsylvania, USA.

Under studieresan gjordes ett stopp hos det familjeägda företaget Golden Triangle Construction som är en entreprenör specialiserad på byggande av betongvägar. I detta fall handlade det om uppförande av ny väg. Enligt entreprenören krävs det ca 5000 yards (eller ca 4,6km) för att det ska vara lönsamt med tanke på de maskiner som krävs. De lägger ca 2000 yds²/dag (eller ca 1700 m²/dag) med tjocklek om ca 250 mm. De har egen mobil betongfabrik som de tar med sig till olika projekt samt egna läggare. Anledningen till egen fabrik är man vill ha bra kapacitet samt ha noggrann kvalitetskontroll på omgående material och utlagd betong. I många fall de haft leveranser har det varit problem med fabriksbetongen att den varit för lös.



Figur 26



Figur 27



Figur 28



Figur 29

5. Slutsatser

Betongvägarna utförda i Sverige fram till mitten av nittitalet har uppvisat relativt bra funktionalitet och livslängd. De senare betongvägarna har generellt inte uppvisat lika goda egenskaper vilket medfört tidigarelagda underhållsåtgärder. Eftersom underhåll och reparationsåtgärder inte funnits tillgängliga har betongvägar inte varit konkurrenskraftiga trots deras fördelar.

En orsak till detta har berott att de val och optimeringar som gjorts i samband med byggnation av betongvägar mer syftat i att kostnadsoptimera än att se till konstruktionens livslängd.

- De betongvägar som finns i Sverige har haft blandade resultat:
 - o Arlanda har visat på mycket liten spårbildning, efter 30 år behövdes ingen åtgärd. I en punkt har kraftig sprickbildning setts vilket beror på dålig undergrund och större trafik än beräknat.
 - o Sträckan Fastarp – Heberg uppvisade problem med sprickor, CG. Sprickor har injekterats och hela plattor har bytts ut.
 - o Förbifart Falkenberg har efter 20 år uppvisat endast 5mm i nötning men däremot har en del längsgående sprickor uppkommit.
 - o Eskilstuna: Beläggningen klarade då inte uppsatta jämnhetskrav i längsled (IRI), bl a pga mycket luftporer. Dessutom var det varierande stenkvalitet och en del problem med bärighet pga för tunt tvärsnitt efter fräsning.
 - o Uppsala har haft spårbildning, troligen beroende på otillräcklig slitstyrka på stenmaterialet. Det gäller framför allt i det övre slitagedelen.
- En förutsättning för att erhålla en kostnadseffektiv betongväg med lång livslängd är att följande värderas och hanteras: Erforderlig dimensionering, val av ingående material & sammansättning, rätt utförande samt lämpliga underhålls- och reparationsåtgärder i rätt tid.
- De finns idag god kunskap om hur betongvägar skall dimensioneras (konstruktion och material) samt byggas på ett hållbart sätt.
- Nya utvecklade recept optimerade för betongvägsändamål samt ökad kunskap om ingående material (som t ex stenmaterialkvalitet) förväntas öka livslängden för nya, moderna betongvägar.
- De finns goda erfarenheter om ett antal drift- och underhållsmetoder internationellt vilka potentiellt skulle kunna vidareutvecklas och optimeras för svenska förhållanden.

Det finns en stor möjlighet att verifiera ovanstående aspekter (dimensionering, materialval och receptur, utförande samt underhåll- och reparationsåtgärder) genom att anlägga och följa upp ett antal provsträckor. Med mildare vintrar minskar användningen av dubbdäck vilket kommer att göra att betongvägar gynnas med mindre slitage och underhåll.

6. Referenser

1/ VTI notat 14-2014: Hultqvist, B.-Å. & Dolk E. (2014). Handbok- Drift, underhåll och reparation av betongvägar. Linköping: Statens Väg- och Transportforskningsinstitut.

2/ Concrete pavement preservation guide, FHWA, 2014,
<https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif14004.pdf>

3/ State of California. Concrete Pavement Guide. California: Caltrans, Division of Pavement Program

4/ AECOM and Britpave (2021). Concrete Pavement Maintenance Manual. Highways England

5/ https://www.researchgate.net/figure/ModieSlab-prefabricated-concrete-pavement_fig3_237818688

6/ Precast Concrete Pavements and Results of Accelerated Traffic Load Test, Erwin Kohler, Louw du Plessis, Peter J. Smith, John Harvey, Tom Pyle (2016).

7/ The Next Generation Concrete Surface (NGCS), https://www.igga.net/wp-content/uploads/2018/08/FSFeb2015_Next_Generation_Concrete_Surface_NGCS.pdf

Bilaga F: LCA av framtagna recept

Nadia Al-Ayish, RISE

Gustav Hållenius, RISE

Åsa Laurell Lyne, RISE

2020



SAMHÄLLSBYGGNAD
INFRASTRUKTUR OCH
BETONGBYGGGANDE



Hållbara Betongvägar – Livscykelkostnadsanalys av framtagna betongrecept

Nadia Al-Ayish, Gustav Hållenius, Åsa Laurell Lyne

RISE Rapport 2020:

Hållbara Betongvägar – Livscykelkostnadsanalys av framtagna betongrecept

Nadia Al-Ayish, Gustav Hållenius, Åsa Laurell Lyne

Abstract

Sustainable concrete roads – Life cycle cost analysis of developed concrete mixes

In Sweden, there are few concrete roads with a total road length of 68 km. As there is little experience in overall, this is a challenge to be able to relate to the national sustainability goals and the transport policy goals. More examples are needed that show how to build sustainable and cost-effective. To do so, it is needed to relate quality data from concrete roads to costs in a life cycle perspective. This present study proposes a method using Life Cycle Cost Analysis (LCCA) together with lab and field data on abrasion resistance. The purpose is to identify concrete mixes for wearing course that provide the lowest cost of investment and over time.

Six different recipes, which have been developed within the project in order give the wearing course as good technical performance as possible, have been evaluated in a life cycle cost analysis based on the net present value method and ASEK. The financial items that were included in a primary analysis are owner costs and user costs. Secondly, the costs were compared against an asphalt road which also includes fuel savings.

The analysis was based on a case study that has been defined by the Swedish Transport Administration. The road consists of three lanes in two directions and is divided into a tunnel section and a "regular" road section. The superstructure is different for the road types and consists of a wear layer between 24 and 25 cm. To include the long-term effect of the choice of concrete recipes, a regression analysis was performed on rutting and wear coefficients (Prall values), measured with Prall-method, on the existing concrete roads in Sweden. Thus, Prall values that have been tested for the concrete recipes have been correlated to the number of years for maintenance (grinding).

The result shows the cost of the concrete recipes does not correlate with the cement content and Prall value, which means that there is potential to build both durable and cost-effective as well as environmentally friendly since the cement is the largest source of emissions in the concrete recipe.

In terms of owner costs, it was found that the cheapest concrete recipe gives the lowest investment cost, which is expected. While the second cheapest recipe, which has the lowest Prall value, provided the lowest maintenance costs. Overall for owner costs, the cheapest concrete gives the lowest costs. When user costs are included, the recipe with the lowest value gives the overall lowest cost. Convenience value therefore plays a crucial role in the economic sustainability of the concrete road. It is proposed that the correlation between condition and Prall value to obtain a statistically proved time-to-maintenance is further studied in future research projects.

Previous comparative LCC studies on concrete and asphalt roads usually show that the investment costs are higher for the concrete road, while the lower maintenance requirement gives a total lower life cycle cost. This study shows that investment costs are equal, with advantage to concrete, and that maintenance-related costs are significantly lower for the concrete road.

Finally, the LCC study on developed concrete recipes for wearing course indicates that it is possible to build both durable and economically and environmentally sustainable concrete roads that can also have great socio-economic savings.

Key words: Concrete roads, LCC, costs, wearing course, quality, maintenance

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2020:

ISBN:

Stockholm 2020

Innehåll

Abstract	2
Innehåll	4
Förord.....	5
Sammanfattning	6
1 Introduktion	7
1.1 Syfte och mål	8
1.2 Omfattning	8
1.3 Studerade betongrecept för slitlager	8
2 Metod.....	9
2.1 LCC	9
2.1.1 Nuvärdeskostnad	9
2.1.2 Kostnadsmodell	9
2.2 Tid till underhåll	11
2.3 Fallstudie.....	12
2.3.1 Jämförelse med asfalt – sekundär analys	12
3 Inventering av kostnader	14
3.1 Betongväg	14
3.2 Asfaltsväg	15
4 Resultat.....	16
4.1 Analys av betongrecept	16
4.2 Analys av befintliga kvalitetsdata – tid till underhåll	17
4.3 LCC av framtagna slitlager i betong	18
4.3.1 Direkta kostnader	18
4.3.2 Nuvärde.....	20
4.3.3 Känslighetsanalys av betongvägar	21
4.3.4 Jämförelse med asfalt.....	21
5 Diskussion och slutsats	23
Referenser	25
Bilagor	26
A. Betongrecept	26

Förord

Föreliggande studie av livscykelkostnaden av slitlager är en del av projektet ”Hållbara betongvägar” som delfinansierats av BVFF, SBUF och cementa. RISE fick i uppdrag att utvärdera i projektet framtagna betongrecept för slitlager med avseende på livscykelkostnader. Syftet är att identifiera faktorer hos betongen som har ett stort inflytande på kostnaderna under en ekonomisk livslängd på 50 år. Resultatet är tänkt att bidra till information om hur ett beständigt slitlager kan väljas till en låg livscykelkostnad.

Sammanfattning

I Sverige finns det få betongvägar som totalt för närvarande utgör en väglängd på 68 km. Då det finns lite erfarenhet samlad är det en utmaning att relatera till de nationella hållbarhetsmålen och de transportpolitiska målen. Det behövs fler exempel som visar hur man kan bygga hållbart och kostnadseffektivt. För att göra det behöver man relatera kvalitetsdata från betongvägar till kostnader i ett livscykelperspektiv. I föreliggande studie föreslås det en metod som använder livscykelkostnadsanalys (LCCA) tillsammans med laboratorie- och fältdata på nötningsmotstånd. Syftet är att identifiera betongrecept för slitlager som ger de lägsta kostnaderna vid investering och över tid.

Sex olika recept har tagits fram i projektet med syfte att ge slitlagret en så god teknisk prestanda som möjligt. Dessa recept har utvärderats med hjälp av en livscykelkostnadsanalys baserad på nuvärdesmetoden och ASEK. De ekonomiska poster som inkluderades i en primär analys är väghållarkostnad och vägarbetskostnad. Sekundärt jämfördes kostnaderna mot en asfaltsväg där även bränslebesparing togs med i kalkylen.

Analysen baseras på en fallstudie som har definierats av Trafikverket. Vägen består av tre körfält i två riktningar och är fördelad på en tunneldel (bergskärning) och en "vanlig" vägdel (lätt bergbank). Överbyggnaden är olika för vägtyperna och består av ett slitlager på mellan 24 och 25 cm. För att inkludera långtidseffekten av val av betongrecept har en regressionsanalys utförts på spårdjup och Prallvärden på de befintliga betongvägarna i Sverige. Således har Prallvärden som har testats på betongrecepten kunnat korreleras till antalet år till underhåll (slipning).

Resultatet visar att kostnaden för betongrecepten per kubikmeter varken korrelerar med cementhalt eller Prallvärde vilket innebär att det finns potential att bygga både beständigt och kostnadseffektivt samt även miljövänligt då cementet är den största utsläppskällan av koldioxid hos betongreceptet.

Vad gäller väghållarkostnader visade det sig att det billigaste betongreceptet ger de lägsta investeringskostnaderna, vilket är förväntat. Medan det näst billigaste receptet, som har det lägsta Prallvärdet, gav lägst underhållskostnader. Totalt för väghållarkostnader ger den billigaste betongen de lägsta kostnaderna. När vägarbetskostnader inkluderas ger receptet med lägst Prallvärde det totalt sett lägsta kostnaderna. Prallvärdet har därför en avgörande roll för betongvägens ekonomiska hållbarhet. Det föreslås att korrelationen mellan tillståndsdata och Prallvärde för att erhålla en statistiskt säkrad tid-till-underhåll studeras vidare i framtida forskningsprojekt.

Tidigare jämförande LCC-studier utfördes på betong- och asfaltsvägar visar oftast att investeringskostnaderna är högre för betongvägen medan det lägre underhållsbehovet ger totalt sett lägre livscykelkostnader. Den här studien visar att investeringskostnaderna är lika, med fördel för betong, och att underhållsrelaterade kostnader är avsevärt lägre för betongvägen.

Slutligen indikerar LCC-studien för inom projektet framtagna betongrecept för slitlager att det går att bygga både beständiga och ekonomiskt och miljömässigt hållbara betongvägar som dessutom kan ha en stor samhällsekonomisk besparing.

1 Introduktion

I Sverige finns det ett fåtal betongvägar som sammanlagt har en längd på 68 km [1]. Dessa utgör endast ca 0,4 % av Sveriges huvudvägnät. Det kan jämföras med Tyskland där hela 28 % av huvudvägnätet är betongvägar [2]. De befintliga svenska betongvägarna byggdes mellan 1990 och 2006. Det lades även ett par betongvägar på 70-talet i Skåne, men dessa har asfalterats om på grund av en kort livslängd. Huvudorsaken till att man lade nya betongvägar beror framför allt på den allt tyngre trafiken. Eftersom betongbeläggningar har en bättre bärformåga jämfört med asfaltsbeläggningar ville man lära sig mer. Dessutom har betongen ett bättre nötningsmotstånd jämfört med asfalt [3]. Därför gjordes 1996 även några provsträckor på E6 vägen utanför Falkenberg där olika typer av väguppbyggnad och olika typer av ballast provades på vägen [4].

Tabell 1 visar var Sveriges betongvägar finns.

Tabell 1 Sveriges betongvägar [3].

Plats	Byggår	Sträckning (km)
E4.väg 65 Arlanda	1990	1,6
E6/120 Falkenberg 1	1993	15
E6/120 Falkenberg 2	1996	13
E20 Eskilstuna	1999	14
E4 Uppsala	2006	23

Då det finns få betongvägar i Sverige är erfarenheten mindre vad gäller den ekonomiska nyttan. Detta är en utmaning för att kunna relatera till de nationella hållbarhetsmålen såväl som de transportpolitiska målen. Det behövs därför flera exempel och en metod som kan relatera kvalitetsdata från betongvägar till kostnader i ett livscykelperspektiv. I den här studien föreslås det en metod som använder livscykelkostnadsanalys (LCCA) tillsammans med laboratorie- och fältdata på nötningsmotstånd.

Tidigare studier på livscykelkostnader (LCC) av betongvägar omfattar oftast en jämförelse med asfalt. Få studier har utfört en analys som påvisar hur betongvägen ska konstrueras för att få en så låg kostnad som möjligt. I en studie av Batouli et al. [5] jämfördes asfalt med betong där väghållarkostnader och andra kostnader relaterade till användarskedet, såsom interaktionen mellan vägytan och fordonet (t.ex. rullmotstånd) samt trafikstörningar på grund av underhållsarbete, undersöktes. Studien visar att asfaltsvägen gav lägre investeringskostnader, men när användarskedet inkluderas har betongvägen en lägre kostnad totalt för en skattad livslängd på 50 år. Liknande resultat har visats i andra studier [6-8]. Det indikerar att betongvägens styrka vad gäller kostnader är relaterad till kvaliteten hos slitlagret. Detta är något som kommer att tas i beaktande i den här studien.

1.1 Syfte och mål

I den här studien utvärderas de betongrecept som har tagits fram av projektgruppen med avseende på livscykelkostnader hos en vägkonstruktion. Syftet är att identifiera designstrategier som ger de lägsta kostnaderna vid investering och över tid. Sex olika recept har tagits fram för att ge slitlagret en så god teknisk prestanda som möjligt. Kostnaderna utvärderas enligt följande steg:

1. Relation mellan recept och tillhörande betongpris för att se om någon parameter ger högre kostnader.
2. Relation mellan pris för framtagna betongrecept och kvalitet för att utvärdera om en högre kvalitet ger en förändring i kostnad.
3. Användning av framtagna betongrecept som slitlager i en fallstudie för att utvärdera slitlagrets påverkan på livscykelkostnaden.
4. Jämförelse med asfalt.

1.2 Omfattning

Studien omfattar materialpriser, kostnader för underhåll, trafikstörningar och olyckskostnader. I underhållet ingår endast slipning av slitlager. Kalkylperioden för den studerade vägen är satt till 50 år i enlighet med ASEK:s rekommendation att en nybyggd väg ska ha en ekonomisk livslängd mellan 40 och 60 år [9]. Studien omfattar i första hand en jämförelse mellan olika betongrecept med tillhörande kvalitet för slitlagret. En jämförelse mellan betong och asfalt tillhör därför inte primäranalysen utan görs sekundärt i den här studien.

1.3 Studerade betongrecept för slitlager

Betongrecept för slitlagret har framtagits av projektets receptgrupp, med begränsande kriterier tillsatt luft för saltfrostbeständighet och Prallvärden (under 20, max 22). Andra utvärderingskriterier som också beaktats är bland annat produktionsmässighet, arbetbarhet, cementshalt (även relaterat till klimatpåverkan). De sju recepten redovisas översiktligt i Tabell 2. En utförlig receptsammanställning redovisas i Bilaga A. I den här studien utvärderas dessa recept genom en LCC analys med hänsyn på kvalitet.

Tabell 2 Översiktlig redovisning av studerade betongrecept.

	5C	4H-2L	5H-2L	5F-3L	5F-4L	5N	5O
Anl FA [kg]	400	390	390	390	380	370	380
Vct	0,37	0,33	0,37	0,33	0,35	0,38	0,38
Prallvärde	21,1	22	18,9	19,1	16,9	26,4	22,8

2 Metod

2.1 LCC

2.1.1 Nuvärdeskostnad

Livscykelkostnadsanalys (LCCA) är en systematisk metod som grundar sig på vedertagna ekonomiska principer och används för att utvärdera långsiktiga effekter av en investering. Syftet kan vara att utvärdera lönsamheten av olika designalternativ för ett material, som i den här studien, eller för att jämföra olika material (exempelvis asfalt och betong). Det bör noteras att vid jämförande LCCA är det inte de absoluta livscykelkostnaderna som är intressanta utan det är den relativa jämförelsen mellan olika alternativ.

Livscykelkostnaderna beräknas genom en nuvärdesanalys som tar hänsyn till dagens värde av framtida kostnader. Framtida kassaflöden diskonteras genom en kalkylräntesats. De kostnader som inte har diskonterats till dagens värde kallas i den här studien för direkta kostnader.

Nuvärdeskalkylen beskrivs matematiskt genom följande ekvation (ekv. 1) [10]:

$$Nuvärdeskostnad = \sum_{n=1}^p \frac{C_n}{(1+d)^n} \quad (\text{ekv. 1})$$

Där:

C är kostnaden vid år n;

d är diskonteringsräntan;

n antal år som beloppet ska diskonteras;

p är kalkylperioden.

2.1.2 Kostnadsmodell

LCC modellen är uppdelad utefter vem som betalar för kostnaderna. Tabell 3 visar uppdelning samt vad som inkluderas i dessa.

Tabell 3 Kostnadsposter som har tagits med i LCC analysen.

Väghållarkostnad	Trafikantkostnader	Samhällskostnader (sekundär analys)
• Investering av material för hela väguppbyggnaden • Underhåll/spårslipning	• Trafikstörningar pga omledning av trafik vid underhåll. • Olyckor pga trafikstörningar	• Bensinbesparing pga slitlagret

Avvecklingskostnader och återinvestering ingår inte i analysen. Återinvestering kan antas kosta lika mycket som en nyinvestering.

Kalkylperioden i analysen har bestämts till 50 år i enlighet med ASEK:s rekommendationer [9]. Det bör även noteras att den ekonomiska livslängden inte nödvändigtvis är densamma som den tekniska livslängden. Den ekonomiska livslängden är oftast kortare än den tekniska. Att den ekonomiska livslängden oftare är kortare kan delvis bero på osäkerheter i framtiden samt att de kostnader som sker långt fram i tiden får ett mindre värde när de diskonteras.

Diskonteringsräntan har valts enligt ASEK:s rekommendationer för en samhällsekonomisk analys, vilket är ett värde på 3,5 %. Vilken diskonteringsränta som används har stor betydelse för resultatet och därför görs ofta i LCCA en känslighetsanalys där räntan varieras. Ju högre ränta desto mer viktig blir investeringskostnaderna medan en lägre ränta gynnar en dyrare investering med längre livslängd.

För att erhålla trafikantkostnaderna har en trafikmodell i enlighet med Trafikverkets rekommendationer använts.

Den information som har använts för att räkna på livscykelkostnaderna för olika slitlager i betong är:

- **Funktionsdata** – underhållsintervall, funktionskrav på ingående delar som nötningsresistens.
- **Tillståndsdata** – historiska data över spårdjup för olika betongvägar.
- **Objektdata** – Antal körfält, vägtyp, väguppbyggnad.
- **Brukardata** – ÅDT, andel tunga fordon.
- **Kostnadsdata** – kostnader för material, slipning och trafik.

Mer information är redovisat i sektion 2.2 och 2.3 samt kapitel 3.

2.2 Tid till underhåll

För att räkna ut tid till underhåll har tillståndsdata från befintliga betongvägar använts. Syftet är att ta fram ett enkelt samband mellan materialegenskap och slitagedata som kan användas till att prediktera tid till underhåll för de framtagna betongrecepten. Analysen har baserats på material och slitagedata (spår djup).

Indata för prediktering kommer från kärnor som har borrats från slitlagren och testats för tryckhållfasthet och Prallvärden, Kulkvarnsvärden har samlats in från byggrapporter och upphandlingsdokument, spår djup har mätts av VTI och tillsammans med andra slitageparametrar använts för att beräkna det justerade slitagevärdet [3].

Arlanda slipades efter 25 år. Då var det totala spår djupet = spår totalt Arlanda. Om man gör följande antaganden att

1. slitage är jämnt fördelat över åren för respektive betongväg,
2. man slipar övriga betongvägar när deras spår djup (eller justerat slitage) är lika Arlandas efter 25 år,
3. antal år till underhåll betongväg $X = [\text{spår totalt Arlanda}] / [\text{spår/år betongväg } X]$

Det är då möjligt att få fram jämförande värden för antal år till underhåll för respektive betongväg. I Tabell 4 nedan ser man då att estimerad tid till underhåll är 55,8 år för Falkenberg S och 15,1 år för Uppsala.

Tabell 4 Antal år till samma spår djup som för Arlanda efter 25 år, dvs. antal år till underhåll.

Betongväg	Antal år till underhåll
Arlanda	25,0
Falkenberg N	46,6
Falkenberg S	55,8
Eskilstuna	17,3
Uppsala	15,1

På liknande sätt kan man använda det justerade slitagevärdet för Arlanda efter 25 år för att beräkna antal år till underhåll för respektive betongvägssträcka. Antagandet är att alla betongvägssträckor underhålls när de slitits ned till samma justerade slitagevärde som Arlandasträckan efter 25 år. Antal år till underhåll är då 34,5 år för Falkenberg och 13,8 år för Uppsala, se Tabell 5.

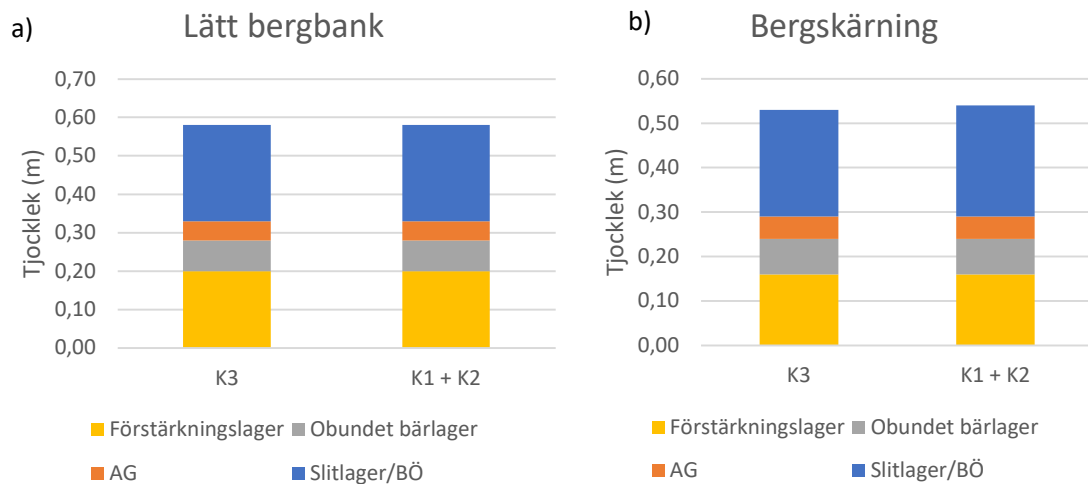
Tabell 5 Antal år till samma justerade slitage som för Arlanda efter 25 år, dvs. antal år till underhåll.

Betongväg	Antal år till underhåll
Arlanda	25,0
Falkenberg N	27,1
Falkenberg S	34,5
Eskilstuna	11,0
Uppsala	13,8

2.3 Fallstudie

Fallstudien där de framtagna betongrecepten för slitlagret är applicerad på är en högttrafikerad väg i klimatzon 2. Vägen är 20 km långt med 3 körfält (K1-K3) i två riktningar för två vägtypen; 10 km i bergskärning (tunneldel) och 10 km i lätt bergbank (utanför tunnel). Årsdygnstrafiken (ÅDT) är 120 000 fordon/dygn varav 8% utgörs av tunga fordon.

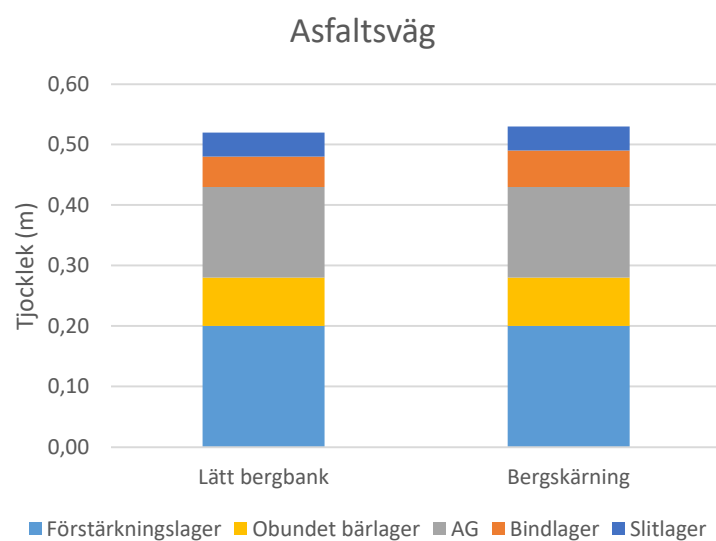
Körfälten är 3 x 3,5 m breda och är uppbyggda enligt Figur 1. K3 utgörs av en 25 cm tjock betongöverbyggnad (BÖ) för lätt bergbank medan för bergskärning är BÖ 24 cm. För körfält K1 och K2 är slitlagret 25 cm för båda vägtyperna. I övrigt består vägen av ett förstärkningslager, obundet bärlager samt asfaltsgrus (AG).



Figur 1 a) Uppbyggnad K3 och K1+K2 vid lätt bergbank. b) Uppbyggnad K3 och K1+K2 vid bergskärning.

2.3.1 Jämförelse med asfalt – sekundär analys

Asfaltsvägen är baserad på samma vägsträcka och förutsättningar som för betongvägen. Uppbyggnaden är enligt Figur 2. Den består av ett förstärkningslager, obundet bärlager, asfaltsgrus och slitlager. Till skillnad från betongvägen finns det ingen skillnad i väguppbyggnad mellan körfälten.



Figur 2 Uppbyggnad av asfaltsvägen för lätt bergbank och bergskärning.

3 Inventering av kostnader

En inventering av kostnader har utförts för investering, underhåll, trafik och olyckor.

3.1 Betongväg

Investering (väghållarkostnad)

Kostnaden för betongen enligt recepten framtagna av projektgruppen har uppskattats av Cementa. I Tabell 6 redovisas kostnaden i kr/m³ för de olika betongrecepten. Receptet med lägst kostnad är 5O medan den med högst kostnad är 5H-2L.

Tabell 6 Kostnader för de olika recepten.

Betongrecept	5C	4H-2L	5F-3L	5F-4L	5H-2L	5N	5O
Kr/m ³	980	1028	1002	976	1032	1005	963

Övriga investeringskostnader är enligt följande:

Både lätt bergbank och bergskärning

AG:	1330 kr/m ³
Obundet bärlager:	410 kr/m ³
Förstärkningslager:	406 kr/m ³

Lätt bergbank

Utläggning betong:	30 kr/m ²
Armeringsjärn:	15 kr/m ²
Arbete armering:	15 kr/m ²
Slipning/Friläggning:	50 kr/m ²
Totalt:	110 kr/m ²

Bergskärning

Utläggning betong:	55 kr/m ²
Armeringsjärn:	3 kr/m ²
Friläggning:	21 kr/m ²
Fogar/profiler:	15 kr/m ²
Totalt:	94 kr/m ²

Underhåll (väghållarkostnad)

Kostnaden för spårslipning är uppskattad till 65 kr/m³ för samtliga körfältstyper i fallet lätt bergbank. För samma åtgärd är kostnaden för körfälten bergskärning 55 kr/m³.

Trafik och olyckor (vägarbetskostnad)

Total kostnad för avstängning vid underhåll har bestämts till 30 000 kr/dag. Olyckskostnader vid avstängning/vägarbete har bestämts till 900 000 kr. För att underhålla vägen räknas det med att den behöver stängas av i 18 dagar för K1 och K2 och 12 dagar för K3 i bergskärning. För lätt bergbank stängs K1 och K2 av i 18 dagar medan K3 stängs av i 9 dagar.

Olyckskostnaderna är baserade på totalt antal fordon som kör i en sträcka i båda riktningarna, totalt antal dagar som trafiken stängs av enligt modell av Trafikverket. Detta ger en kostnad på 216 000 kr/dygn.

3.2 Asfaltsväg

Investering (väghållarkostnad)

Följande kostnader i Tabell 7 är inkluderade i beräkningen av investeringskostnaderna för asfaltsvägen:

Tabell 7 Materialkostnader för asfaltsvägen.

Material	Kostnad (kr/m ³)
Slitlager, (ABS)	2000
Bindlager	1350
AG	1330
Obundet bärlager	410
Förstärkningslager	406

Underhåll (väghållarkostnad)

Underhållskostnaden för asfaltsvägen har uppskattats av Trafikverket till 91 kr/m² för bergskärning och 97 kr/m² för lätt bergbank. Underhållsintervallen är uppskattade enligt Trafikverket enligt följande:

K1+K2: år 10, 20, 28, 40

K3: år 10, 22, 40

Underhåll av bindlager sker år 40 och är uppskattad till 80 kr/m² respektive 171 kr/m² för K1+K2 respektive K3 i bergskärning och 95 kr/m² för K1+K2 i lätt bergbank.

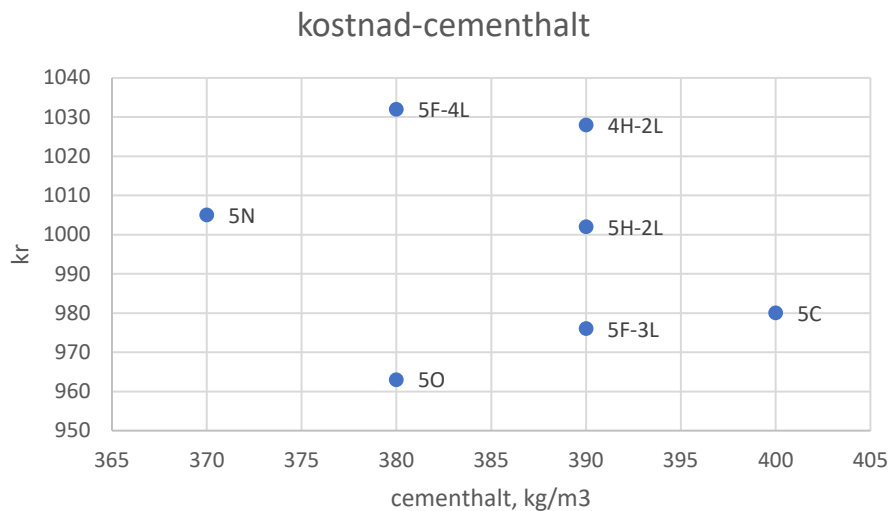
Trafik och olyckor (vägarbetskostnad)

Samma kostnader som för betongvägen men med 16 dagars avstängning.

4 Resultat

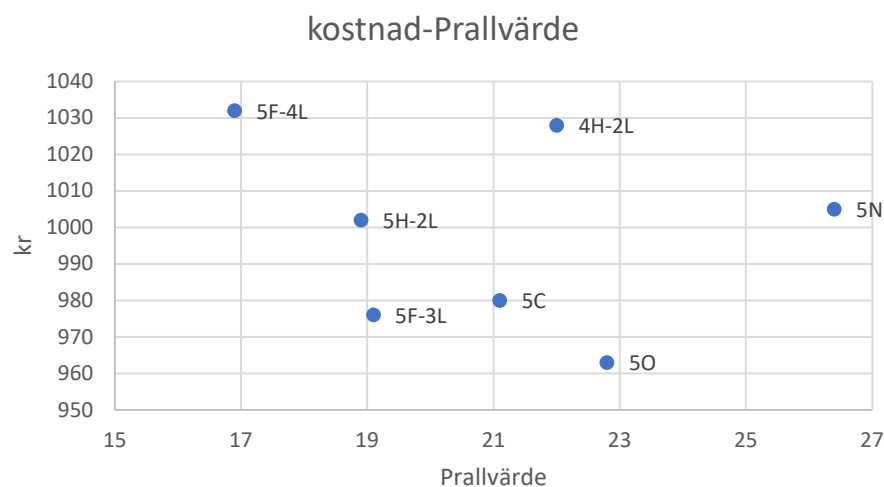
4.1 Analys av betongrecept

Resultatet för de framtagna betongrecepten visar att det inte finns något samband mellan cementmängden och kostnad att ta fram betongen (Figur 3). Vanligtvis är betongpriset för byggnader direkt korrelerat till cementhalten eller indirekt, vct.



Figur 3 Betongpriset i förhållande till cementhalten.

Ur miljösynpunkt ger en betong med lägre cementklinkerhalt ett lägre utsläpp av växthusgaser. Det innebär att en miljövänlig betong även skulle kunna ha ett lågt pris. Men för att visa det behöver hela livscykeln beaktas. Här spelar kvalitet in. För att undersöka om kvalitet har sitt pris, relaterades även kostnaderna till undersökta Prallvärdet (Figur 4). Inte heller här syntes ett samband. Generellt är silika och tillsatsmedel dyra material och en liten ökning av dessa kan ge en märkbar skillnad i pris.



Figur 4 Betongpriset i förhållande till Prallvärdet.

4.2 Analys av befintliga kvalitetsdata – tid till underhåll

Regressionsanalys kan användas för att prediktera tid (dvs år) till underhåll som baseras på material- och slitagedata. Tanken med regressionsanalysen är att finna ett enkelt samband för att beskriva eller förklara observerad variation i y-data (slitage) med hjälp av motsvarande x-data (materialdata). I den här studien har vi valt att göra det med ett linjärt funktionssamband som är ett förenklat sätt att leta efter samband mellan variabler. Det högst förväntade $R^2 = 0,867$ observerades mellan justerat slitage och Prall. Sambandet mellan 'Antal år till samma justerade slitage som för Arlanda efter 25 år (eller underhåll)'

$$= - 0,8488 * \text{Prall} + 45,825.$$

Utifrån ett givet värde på Prall för en betongkvalité är det då möjligt att estimerar "Antal år till samma justerade slitage (eller underhåll) som för Arlanda efter 25 år". I Tabell 8 har antal år till underhåll beräknats på uppmätta Prallvärden för betong där recepten har tagits fram av receptgruppen inom projektet "Hållbara betongvägar". Predikterat antal år till underhåll för de framtagna betongkvalitéerna varierar mellan 26 och 31 år.

Tabell 8 Antal år till samma justerade slitage som för Arlanda efter 25 år, dvs. antal år till underhåll beräknade på uppmätta Prallvärden.

Prov	Prall (cm ³)	Antal år till samma justerade slitage som för Arlanda efter 25 år (Y = - 0.8488x + 45,825)
5C	21,1	28
4H-2L	22,0	27
5H-2L	18,9	30
5F-3L	19,1	30
5F-4L	16,9	31
5N	26,4	23
5O	22,8	26

4.3LCC av framtagna slitlager i betong

4.3.1 Direkta kostnader

Investering

Summan av alla investeringskostnader för lätt bergbank respektive bergskärning för körfält K1 och K2 samt K3 redovisas i Tabell 9-Tabell Tabell 12. Kostnaderna redovisas i kr per kvadratmeter vägyta. Ur tabellen framgår det att slitlagret har den största andelen av kostnaden samt att det skiljer sig 3 % mellan högsta (4H-2L och 5H-2L) och lägsta (5O) värde för betongrecepten för båda vägtyperna.

Tabell 9 Investeringskostnader för lätt bergbank, K3.

	5C (kr/m ²)	4H-2L (kr/m ²)	5H-2L (kr/m ²)	5F-3L (kr/m ²)	5F-4L (kr/m ²)	5N (kr/m ²)	5O (kr/m ²)
Slitlager	249	262	263	255	248	256	245
AG	91	91	91	91	91	91	91
Obundet bärlager	34	34	34	34	34	34	34
Förstärkningslager	87	87	87	87	87	87	87
Övrigt	110	110	110	110	110	110	110
Totalt	571	584	585	577	570	578	567

Tabell 10 Investeringskostnader för lätt bergbank, K1+K2.

	5C (kr/m ²)	4H-2L (kr/m ²)	5H-2L (kr/m ²)	5F-3L (kr/m ²)	5F-4L (kr/m ²)	5N (kr/m ²)	5O (kr/m ²)
Slitlager	247	259	260	253	246	253	243
AG	89	89	89	89	89	89	89
Obundet bärlager	34	34	34	34	34	34	34
Förstärkningslager	84	84	84	84	84	84	84
Övrigt	110	110	110	110	110	110	110
Totalt	564	576	577	570	563	570	560

Tabell 11 Investeringskostnader för bergskärning, K3.

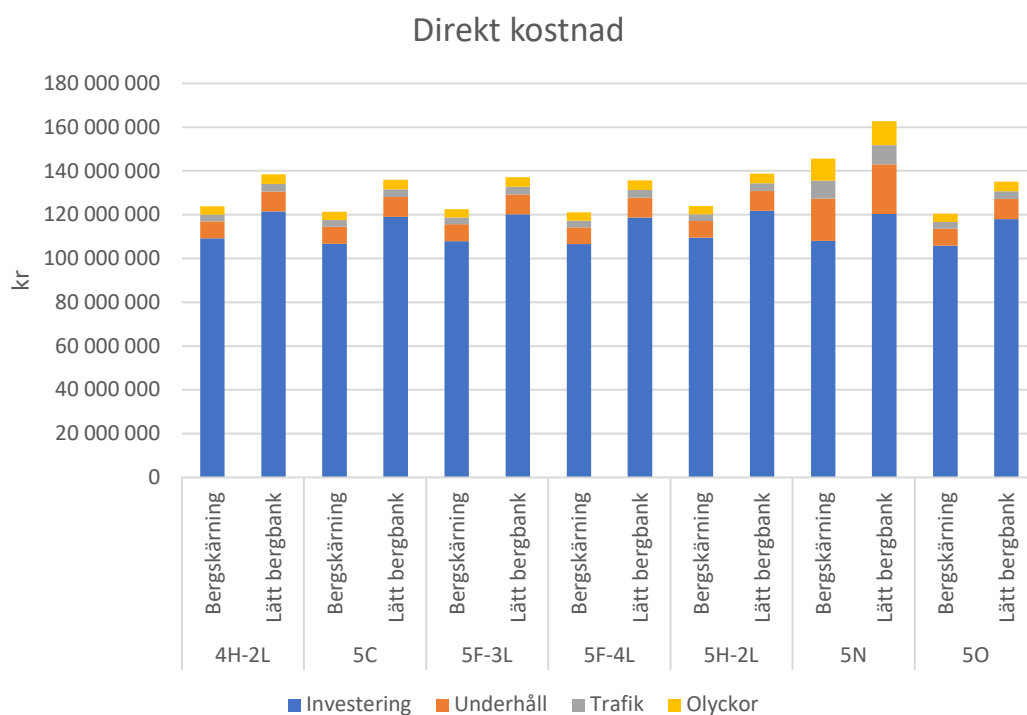
	5C (kr/m ²)	4H-2L (kr/m ²)	5H-2L (kr/m ²)	5F-3L (kr/m ²)	5F-4L (kr/m ²)	5N (kr/m ²)	5O (kr/m ²)
Slitlager	239	251	252	245	238	245	235
AG	69	69	69	69	69	69	69
Obundet bärlager	34	34	34	34	34	34	34
Förstärkningslager	69	69	69	69	69	69	69
Övrigt	94	94	94	94	94	94	94
Totalt	506	517	518	511	505	512	502

Tabell 12 Investeringskostnader för bergskärning, K1+K2.

	5C (kr/m ²)	4H-2L (kr/m ²)	5H-2L (kr/m ²)	5F-3L (kr/m ²)	5F-4L (kr/m ²)	5N (kr/m ²)	5O (kr/m ²)
Slitlager	247	259	260	253	246	253	243
AG	68	68	68	68	68	68	68
Obundet bärlager	34	34	34	34	34	34	34
Förstärkningslager	67	67	67	67	67	67	67
Övrigt	94	94	94	94	94	94	94
Totalt	510	522	523	515	509	516	505

Väghållar- och vägarbetskostnader

De direkta kostnaderna för både väghållning och vägarbete redovisas i Figur 5. Recept 5N har de största kostnaderna totalt för både bergskärning och lätt bergbank. Anledningen är att 5N har ett högre Prallvärde som indikerar att slitlagret kommer behöva slipas en gång mer än övriga recept under en kalkylperiod på 50 år.

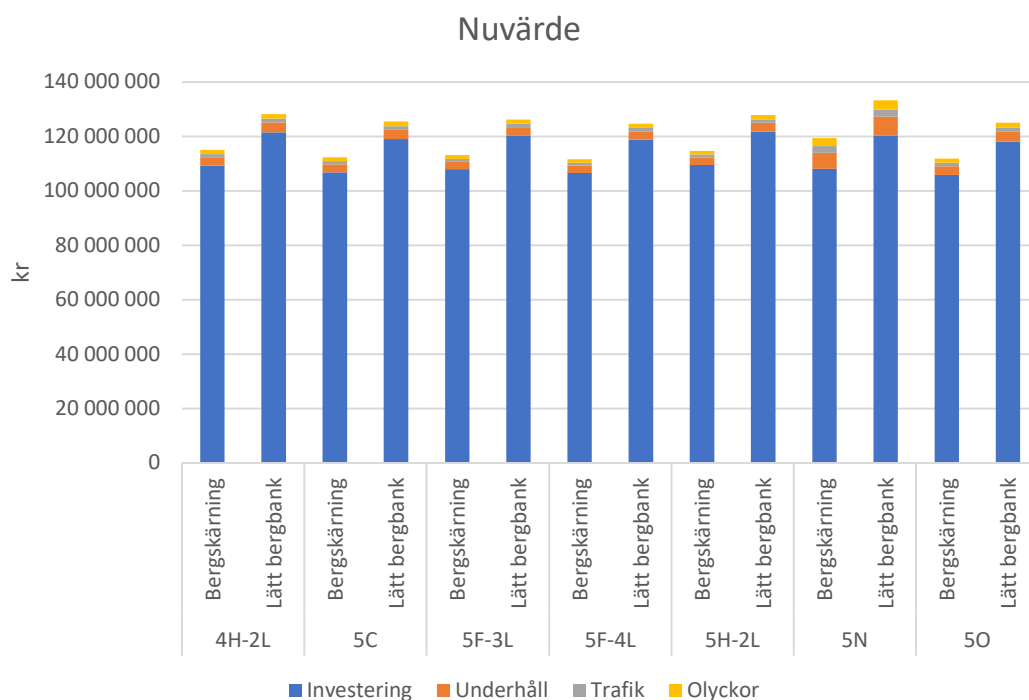


Figur 5 Vägtypernas inv.- underhålls- trafik- och olyckskostnad (direkt kostnad) för de olika recepten.

4.3.2 Nuvärde

När framtida kostnader diskonteras till ett nuvärde minskar skillnaden mellan betongrecepten (Figur 6). Det framgår i resultatet att investeringskostnaderna utgör den absolut största delen av livscykelkostnaderna. De framtagna recepten håller dessutom en god kvalitet vilket gör att underhållskostnaderna hålls minimala. När en nuvärdeskalkyl utförs spelar det en stor roll när i tiden en kostnad sker. Ju tidigare underhållet görs desto högre blir den kostnadsdelen. Den minskar exponentiellt med tiden enligt ekvation 1.

Recept 5N, som inte är det dyraste receptet, visade sig ge de högsta livscykelkostnaderna. Detta är på grund av kortare underhållsintervall.



Figur 6 Vägtypernas inv.- underhålls- trafik- och olyckskostnad (nuvärde) för de olika recepten.

Skillnaden i LCC mellan de olika betongrecepten är ganska liten. Mest påtaglig är 5N, som tidigare nämnts, på grund av kortare underhållsintervall. Tabell 13 visar totala (summan av bergskärning och lätt bergbank) väghållarkostnader samt vägarbetskostnader, i SEK, för de olika recepten. Där framgår det att betong 5F-4L har den lägsta livscykelkostnaden. Detta är på grund av de låga underhållskostnaderna. Betong 5O har lägst investeringskostnad och väghållarkostnader, men om man även tar i beaktande vägarbetskostnader så tjänar samhället mer på lösningar med lågt underhåll, trots något högre investeringskostnad.

Tabell 13 Nuvärdeskostnader summerade för de 6 betongrecepten. Lägsta kostnader är färgmarkerade.

Recept	Väghållarkostnader			Vägarbetskostnader			Summa
	Investering	Underhåll	Summa	Trafik	Olyckor	Summa	
Betong 4H-2L	230 783 620	6 636 206	237 419 826	2 586 507	3 235 150	5 821 658	243 241 483
Betong 5C	225 718 396	6 411 793	232 130 189	2 499 041	3 125 749	5 624 790	237 754 979
Betong 5F-3L	228 039 957	5 985 477	234 025 434	2 332 881	2 917 920	5 250 802	239 276 236
Betong 5F-4L	225 296 294	5 783 070	231 079 364	2 253 992	2 819 247	5 073 238	236 152 602
Betong 5H-2L	231 205 722	5 985 477	237 191 199	2 332 881	2 917 920	5 250 802	242 442 001
Betong 5N	228 356 534	12 792 989	241 149 522	5 091 030	6 366 027	11 457 057	252 606 580
Betong 5O	223 924 463	6 868 473	230 792 935	2 677 035	3 348 381	6 025 416	236 818 351

4.3.3 Känslighetsanalys av betongvägar

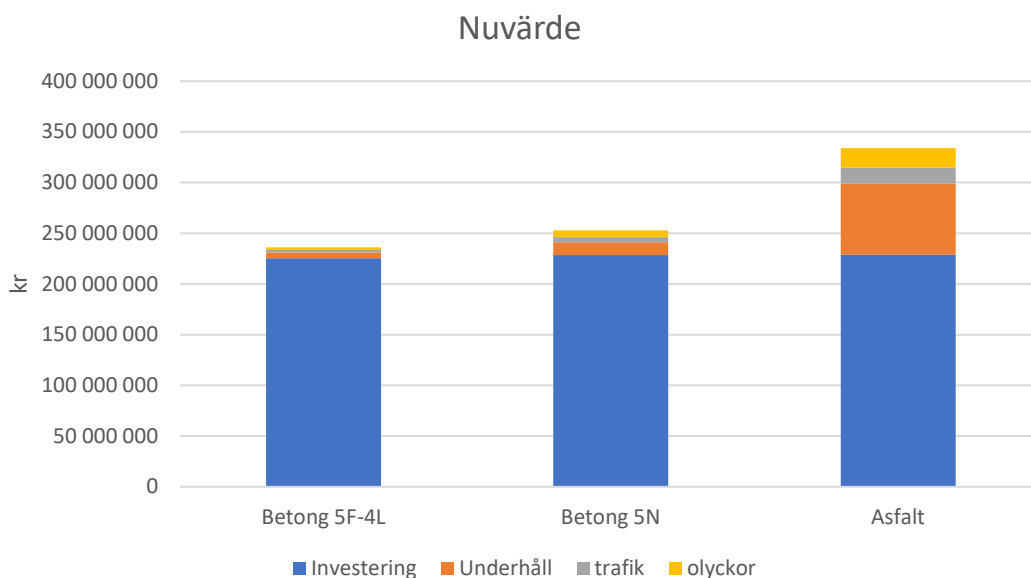
En känslighetsanalys har utförts för att undersöka räntans inverkan på den totala livscykelkostnaden. Syftet är att se om en högre ränta ger en fördel för betongrecept 5O som har låga väghållarkostnader. En ränta på 2% jämfördes med en ränta på 5%. Resultatet visar att betong 5F-4L fortfarande har de lägsta totala kostnaderna och slutsatsen är oförändrad (se Tabell 14).

Tabell 14 Känslighetsanalys av nuvärdeskostnaden där räntan varieras från 2% till 5%. Lägsta kostnader är färgmarkerade.

Recept	Väghållarkostnader		Vägarbetskostnader		Summa	
	2 % ränta	5 % ränta	2 % ränta	5 % ränta	2 % ränta	5 % ränta
Betong 4H-2L	240 626 102	235 283 472	8 634 386	3 947 526	249 260 488	239 230 998
Betong 5C	235 367 888	230 003 969	8 465 084	3 759 549	243 832 973	233 763 518
Betong 5F-3L	237 314 748	231 927 098	8 136 375	3 410 022	245 451 123	235 337 120
Betong 5F-4L	234 389 226	228 998 333	7 976 838	3 247 640	242 366 064	232 245 973
Betong 5H-2L	240 480 513	235 092 863	8 136 375	3 410 022	248 616 888	238 502 885
Betong 5N	249 144 627	236 497 248	18 695 122	7 262 378	267 839 749	243 759 626
Betong 5O	233 963 794	228 649 307	10 328 224	4 144 903	244 292 018	232 794 209

4.3.4 Jämförelse med asfalt

Asfaltsvägen har jämförts med betongvägen med lägsta respektive högsta livscykelkostnader (5F-4L och 5N). Investeringskostnaden ligger på ungefär samma nivå som för betong 5N (Figur 7). Däremot har den kortare underhållsintervall som startar vid år 10 vilket gör att den totala nuvärdeskostnaden blir högre. Det bör dock noteras att underhållsintervallen för betong respektive asfalt är baserade på olika antaganden. Betongen är baserad på labbdata som har analyserats med hjälp av fältstudier medan asfalten är baserad på erfarenhet.



Figur 7 Nuvärdeskostnad för betongvägen med den lägsta och största värden i jämförelse med en asfaltväg.

4.3.4.1 Bränslebesparing

Enligt EUPAVE [8] kan en väg med en betongyta istället för asfalt ge en bränslebesparing på 2,35 % i medelvärde. VTI visar liknande siffror i en senare studie [11] för betongvägen vid Uppsala. De kom fram till att för personbilar är bränslebesparingen 1,1% medan för tunga lastbilar ligger den på 5 % i medelvärde. Den lägre bränsleförbrukningen förklarades bero på lägre rullmotstånd jämfört med asfaltbeläggningen.

För att räkna ut bränslebesparingen användes 2019 årsmedelpris för bensin (blyfri 95) 5,97 kr/l produkt och marginal. För diesel motsvarade det 8,21 kr/l [12]. Hur mycket bränsle som går åt för tunga lastbilar respektive personbilar är hämtat ur [11].

Applicerat på fallstudien som har en sträcka på 20 km ger det en bränslebesparing på ca 17 miljoner kr per år. Räknat på en kalkylperiod på 50 år blir nuvärdet av detta 410 miljoner kr. Men detta är grundat sig på ett konstant bränslepris enligt ovan samt en konstant ÅDT.

5 Diskussion och slutsats

En livscykelkostnadsanalys har utförts på framtagna betongrecept av projektgruppen i syfte att finna designparametrar som kan ge lägre kostnader. Analysen utfördes med en nuvärdesmetod och modell enligt ASEK.

Resultatet visade att det i det aktuella fallet inte finns något samband mellan cementhalt eller Prallvärde och betongpris. Cementhalten är en viktig parameter vad gäller utsläpp av klimatgaser. Att det inte finns något samband mellan den och kostnader innebär att det går att bygga både miljömässigt hållbart och billigt. Prallvärdet ger en indikation på kvalitén och om vägen kommer att behöva slipas med längre eller kortare mellanrum. Att det inte finns något samband här ger även en indikation på att det finns potential att bygga både beständigt och kostnadseffektivt.

När väghållarkostnaderna, investering och underhåll, analyserades visade det sig att betong 5O har både den lägsta investeringskostnaden och totala kostnaden. Medan betong 5F-4L gav den lägsta underhållskostnaden. Dessa är de två billigaste betongrecepten. 5O har ett Prallvärde på 22,8 medan 5F-4L har ett Prallvärde på 16,9 vilket är det lägsta värdet av alla recepten. Skillnaden i totala väghållarkostnader mellan dessa två är dock marginellt liten.

Om man även tar hänsyn till vägarbetskostnader som trafikstörningar och olyckor på grund av vägarbete, visar betong 5F-4L en fördel med sina långa underhållsintervall. Slutsumman med både väghållarkostnad och vägarbetskostnad blir följaktligen lägst med den betongen. En känslighetsanalys utfördes även där diskonteringsräntan varierades mellan 2% och 5%. Slutsatsen förändrades inte, 5F-4L gav fortfarande lägst resultat. Långtidseffekten av designval är således av stor vikt och rekommenderas att tas i beaktande vid LCC studier.

Tiden till slipning beräknades genom en regressionsanalys av befintliga fältdata från de fem svenska betongvägarna samt Prallvärden som erhöles i detta projekt. Analysen grundar sig på få mätdata men det ger samtidigt intressanta samband som kan undersökas vidare i framtida forskningsprojekt. Denna analys är en väldigt viktig del av LCC studien som möjliggör en jämförelse över hela livslängden.

Sekundärt utfördes även en jämförande analys mellan betongvägen med lägsta respektive största nuvärdeskostnaderna och en asfaltsväg. Resultatet visade att investeringskostnaderna är ungefär lika stora mellan dessa, med fördel betong. Men när underhållet togs med blev skillnaderna tydligare på grund av asfaltsvägens frekventare underhållsintervall. Även bensinbesparing på grund av skillnad i yta togs med i den sekundära analysen. Den baserades på en tidigare studie av VTI och visade att det finns en potential med stora ekonomiska vinster, på 410 miljoner kr, om betong används. Detta baseras dock på ett 2019 års medelvärde i bränslepris, vilket man vet kan fluktuera under en längre period. Men det som påverkar kostnaden mest är ÅDT, antalet tunga och lätta fordon samt skillnaden mellan underlagen. Även om man skulle räkna konservativt med en lika bränslebesparing på 1,1% för alla fordon skulle det ge stora kostnadsvinster.

Sammanfattningsvis kan det konkluderas att det går att bygga både beständiga och ekonomiskt och miljömässigt hållbara betongvägar som dessutom kan ha en stor samhällsekonomisk besparing.

Referenser

1. Dolk, E., J. Silfwerbrand, and S. Erlingsson. *Concrete pavement Falkenberg, Sweden: a 20 year review*. in *11th International Conference on Concrete Pavements (ICCP), San Antonio, August 28-September 1, 2016*. 2016.
2. Silfwerbrand, J., *Betongbeläggningar för flygfält – svenska erfarenheter*. 2018, KTH: Arlanda, 21 aug. 2018.
3. Dolk, E. *Concrete pavements' resistance to studded tyres*. in *XXIII Symposium on Nordic Concrete Research & Development, Aalborg, 2017*. 2017.
4. Wiman, L.G., et al., *Prov med olika överbyggnadstyper: uppföljning av observationssträckor på väg E6, Fastarp-Heberg. 1996-2006*. 2009: Statens väg-och transportforskningsinstitut.
5. Batouli, M., M. Bienvenu, and A. Mostafavi, *Putting sustainability theory into roadway design practice: Implementation of LCA and LCCA analysis for pavement type selection in real world decision making*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017. **52**: p. 289-302.
6. Handayani, et al., *Agency cost estimation on flexible and rigid pavement*. In MATEC Web of Conferences (Vol. 258; p. 02020). 2019. **EDP Sciences**.
7. Dahlin, et al., *Jämförelse mellan asfalt-och betongbeläggningar*. Uppdatering av kalkylmodellen 2Ö (Master's thesis). 2007. **Lunds Tekniska Högskola; Lunds Universitet**.
8. EUPAVE, *Concrete Roads: a Smart and Sustainable Choice*. 2010.
9. Trafikverket, *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.1*. 2018.
10. 15686-5:2008, S.-I., *Byggnader och byggnadsverk - Livslängdsplanering - Del 5: Livscykelkostnader*. (ISO 15686-5:2008; IDT), 2008.
11. Jonsson, P. & Hultqvist, B. Å. 2009. Mätning av bränsleförbrukning på asfalt-och betongbeläggningar norr om Uppsala. Statens väg-och transportforskningsinstitut.
12. SPBI 2020. Årsmedelpriser motorbränslen. Hämtat från: <https://spbi.se/statistik/priser/mer-prisstatistik/arsmedelspriser-motorbranslen/> den 5 maj 2020

Bilagor

A. Betongrecept



Memo

Till: Mats Gustafsson
 Datum: 2019-11-28
 Från: Iad Saleh, NCC

Gällande val av recept till PVM

Den 10 oktober 2019 hade receptgruppen ett Lync-möte kring val av recept till provvägsmaskin (PVM), utifrån de framtagna recepten från totalt 5 provningsomgångar. Efter påpekande från VTI om att för dåligt prallvärde kan ge fel utslag med ett ökande slitage pga studsande hjul valdes ett nytt referensrecept. Nedan är den slutliga, inom referensgruppen, överenskomna receptlistan med motivering:

- Har endast valt recept med luft i för att klara saltfrostbeständighet samt med goda prallvärden, helst under 20 men max 22.
- 5C: Ett recept med bra prall, utan silka och relativt högt vct.
- 4H-2L: Ballast från Hovgården med luft och silika. Alt till Torphyttan. Bästa resultatet från Hovgården.
- 5H-2L: ett av de bästa recepten map Prall.
- 5F-3L: Bra prall värden (<20) med mkt lågt vct och mkt silika, samt stensmjöl.
- 5F-4L: Bästa resultatet map prall, mindre partikelsprång med stensmjöl, moderat cementhalt.
- 5N (amerikansk) referens med ett sämre kulkvarnsvärde i förhållande till de övriga recepten.
- 5O: Amerianskt recept med ok prallvärde och relativt god arbetbarhet. Så få partikelsprång som möjligt, ingen silika och relativt låg cementhalt.

Förutom provvärden så har våra utvärderingskriterier också varit: Produktionsmässighet (på fabrik), arbetbarhet, cementhalt (CO₂) mm.

Sammanställning över recepten med resultat bifogas.

Vänligen, receptgruppen
 Iad Saleh, Niklas Johansson, Thomas Johansson, Sten Hjelm.

Val av recept 191128.docx

omgång 1		omgång 2		omgång 4		omgång 5	
Blandning nr		Blandning nr		Blandning nr		Blandning nr	
Stenmaterial		Stenmaterial		Stenmaterial		Stenmaterial	
vct		vct		vct		vct	
Anl FA		Anl FA		Anl FA		Anl FA	
Vatten		Vatten		Vatten		Vatten	
Fyll Sika RMC 320		Sika Emsac 500E		Sika Emsac 500E		Fyll Sika Viskorete 3040 WC	
Luft Micro Air		Luft Micro Air		Luft Micro Air		Luft Micro Air (10%)	
Grushalt Riksten 0-8 NK		Grushalt Riksten 0-8 NK		Grushalt Riksten 0-8 NK		Riksten 0-8 NK	
Stenhalt		Gladd 0-4 K		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Färska egenskaper		Stenhalt		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Sätmått, mm		Färska egenskaper		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Densitet, kg/m ³		Sätmått, mm		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Luftfyllt, %		Densitet, kg/m ³		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Kompakterbarhet, ICT		Luftfyllt, %		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Skärkraft vid 10 cykler		Kompakterbarhet, ICT		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Kommentar		Kommentar		Kommentar		Kommentar	
Tryckhållfasthet, 7d		Tryckhållfasthet, 28d		Tryckhållfasthet, 28d		Tryckhållfasthet, 28d	
1		1		1		1	
2		2		2		2	
3		3		3		3	
Medel		Medel		Medel		Medel	
Tryckhållfasthet, 28d		Tryckhållfasthet, 28d		Tryckhållfasthet, 28d		Tryckhållfasthet, 28d	
1		1		1		1	
2		2		2		2	
3		3		3		3	
Medel		Medel		Medel		Medel	
Spräckhållfasthet, 28d		Spräckhållfasthet, 28d		Spräckhållfasthet, 28d		Spräckhållfasthet, 28d	
1		1		1		1	
2		2		2		2	
3		3		3		3	
Medel		Medel		Medel		Medel	
Tryckhållfasthet, 28d		Tryckhållfasthet, 56d		Tryckhållfasthet, 56d		Tryckhållfasthet, 56d	
1		1		1		1	
2		2		2		2	
3		3		3		3	
Medel		Medel		Medel		Medel	
Prall, 28-35d		Prall, 100-105d		Prall, 100-105d		Prall	
1		1		1		1	
2		2		2		2	
3		3		3		3	
Medel		Medel		Medel		Medel	
Frostbeständighet		Frostbeständighet		Frostbeständighet		Frostbeständighet	
14 cykler		14 cykler		14 cykler		14 cykler	
28 cykler		28 cykler		28 cykler		28 cykler	
56 cykler		56 cykler		56 cykler		56 cykler	
0.01		0.01		0.01		0.01	

Mollivering till val av recept:

1. Har endast valt recept med luft i för att klara saltfrostbeständighet samt med goda prallvärden, helt under 20 men max 22
2. 5C: Ett recept med bra prall och utan silika och relativt högt vct
3. 5N referens med ett sämre kulkravvärde
4. 4H-2L: Ballast från Hovgården med luft och silika. Allt till Torphytan. Basta resultatet från Hovgården
5. 5H-2L: ett av de bästa recepten med prall
6. 5F-3L: Bra prall värden (<20) med mkt lågt vct och mkt silika, samt stenhåll
7. 5F-4L: Basta resultatet med prall, mindre partikelsprång med stenhåll, moderat cementhalt
8. 5O: Amerianskt recept med gott prallvärde och relativt god arbetbarhet. Så få partikelsprång som möjligt, ingen silika och låg cementhalt

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 200 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 5604, 114 86 STOCKHOLM
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Infrasstruktur och
betongbyggande
RISE Rapport 2020:
ISBN:

Utveckling av hållbar och slitstark betong till betongvägar

Iad Saleh, NCC Sverige AB

Niklas Johansson, Cementsa

Sten Hjelm, Cementsa

Thomas Johansson, Skanska

2021-03-21

Innehåll

1. Inledning	3
1.1. Bakgrund.....	3
1.2. Syfte och mål	3
2. Utförande	3
2.1. Metodbeskrivning	3
2.2. Provmångar och stegvis analys av egenskaper	7
Labomgång nr 1	7
Labomgång nr 2	8
Labomgång nr 3	8
Labomgång nr 4	8
Labomgång nr 5	8
3. Resultat.....	9
4. Diskussion / val för recept för vidare provning i PVM.....	10
5. Plattorna som tillverkades.....	15
6. Slutsatser	15
7. Bilaga: Samtliga provningar	16

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Detta arbete är genomfört inom ramen för ett SBUF-finansierat projekt som handlar om att utveckla hållbara betongvägar. Sverige har ett fåtal objekt där vägar gjuts med betong, med blandade resultat. Det senaste projektet, E4 Uppsalavägen, har fått mycket kritik för bristande hållbarhet varför Trafikverket bestämt sig för att inte använda betong till kommande Förbifart Stockholm. Det är förstås beklagligt men detta projekt försöker på nytt etablera teknik och metodik för kommande projekt.

1.2. Syfte och mål

Syftet med denna rapport är att presentera olika receptkoncept som kan bli aktuella för en betongväg. Målet är att det ska vara ge tips och goda råd inför kommande betongvägsprojekt för att undvika högt slitage och en väg som totalt sett ger en bättre LCC och LCA jämfört med en konventionell väg.

2. Utförande

Detta kapitel beskriver utvecklingen av framtagande och optimering av hållbar betong för vägändamål.

2.1. Metodbeskrivning

Rent generellt har setts, bland annat från asfaltssidan, att det framför allt är stenens nötningsbeständighet (kulkvarnsvärde, kkv) som bestämmer slitaget – ju mer beständig (lågt kkv) sten desto mindre slitage. Det var också en av de faktorer som var styrande för dimensionering av recept. Andra viktiga faktorer som togs hänsyn till var:

- Mängden sten, där ambitionen i de flesta fall var att ha mer än 50%, helst över 60%. Men mycket sten (krossad ballast) skapar de andra utmaningar i form av sämre arbetbarhet. Vid receptframtagningen var målet att ha ett sättmått <20mm för att betongen ska kunna transporteras med konventionell lastbil och läggas med läggare. Ett lågt sättmått ger också en bra bild över stenmaterialets cementbehov och kompaktering vid vibrering.
- Fördelning av sten: I de första provomgångarna provades mycket sten utan hänsyn tagen till den totala siktkurvan vilket också gav partikelsprång, men i ett senare skede provades även att jämma ut den totala siktkurvan genom att täppa till dessa. Detta är vanligt i en amerikansk metod som kallas tarantellametoden där egenskaperna för stenmaterialet passas in en graderingskurva som påminner om en tarantellaspindel.
- Produktion
 - o Befintliga vanliga material i möjligaste mån med undantag för stenmaterialet (>8mm). Det kan till exempel vara med avseende på tillsatsmedel och på befintliga grusmaterial eller maskinproducerat stenmjöl.
- Inga vct över 0,40 för att säkerställa att de klarar av de tuffaste klasserna med avseende på tösaltning och frost (exponeringsklasser XD3 och XF4).
- Miljö (CO₂). Receptgruppen har även hela tiden haft ett öga på CO₂-avtrycket för receptet i utvecklingen. I detta fall har därför Anläggningscement FA använts som enligt Cementa har ca 20% lägre CO₂-avtryck jämfört med vanliga anläggningscement. Optimeringar har gjorts och cementhalter har sänkts där det är möjligt utan att produktionsvänligheten eller betongegenskaperna blivit lidande i den mån det går. Därtill har även stenmjöl provats då det blir mer vanligt som en delkomponent i betongrecept i olika delar av Sverige.
- Möjlighet att hitta material. Att hitta material lämpliga för betong med ett kulkvarnsvärde <5 eller i närheten valdes ut.

Olika stenmaterial eftersöktes från olika täkter och totalt erhöles 7 olika stenmaterial som hade ett lågt kulkvarnsvärde 4-7:

- Durasplit, 11-16mm
- Hovgården, 11-16mm
- Skutskär, 11-16mm
- Torphyttan, 11-16mm
- Orsa, 11-16mm
- Ryolit, 8-16mm
- Harbo, 11-16mm

En del material, som till exempel Durasplit och Hovgården, har provats i tidigare projekt och som har dokumenterat bra kulkvarnsvärden, togs med även i detta projekt för att få en bra jämförelse.

I möjligaste mån önskades ett kubiserat material men det var inget absolut krav.

Utöver detta användes också en ett referensmaterial i form av naturmaterial från Enhörna med ett kulkvarnsvärde > 10. Detta för att kunna se en klar relation gällande kulkvarnsvärde och slitage eller Prall.

Gällande ”limmet” i betongen var svårigheten att ”dimensionera” själva cementpastan. Då den ofta är svagare än stenen kan den riskeras bort slitas bort först vilket kan skapa förutsättningar för vidare slitage av beläggningen. Och hur stark ska den vara i så fall? Eller ska ambitionen vara att den ska vara så tät som möjligt, eller till och med både och? Då mekanismen är något oklar så bestämdes det att olika åtgärder ska provas fram:

- Variation i vct (och därmed olika mängder cement).
- Med silikaslurry i olika grad

I en första filtrering (labomgång 1) provades ett referensrecept där endast stenmaterialet byttes ut för att se hur betongen påverkades både med avseende på färsk och härdad betong. Utgångsläget för cementhalt var 390kg men i vissa fall ökades den med 10kg för att kunna erhålla likvärdighet. Det var dock inte tal om någon cementoptimering, vilket skulle sparas till omgång 2. Dessutom var det två olika nivåer för mängden som skulle blandas in – 60% och 65%.

För samtliga betongrecept provades den färska betongen och bedömdes utifrån arbetbarhet och cementåtgång samt försök till bedömning av kompaktering via en så kallad ICT (provning enligt NT Build 427). En ICT-kompakterare används normalt till styva/jordfuktiga betonger (för till exempel stenplattor) och med den uppmättes den skärkraft som krävs för 10 cyklers belastning/kompaktering. Dvs vilken kompaktering som erhöles för en bestämd betongmängd för ett bestämt antal kompakteringscykler.



Figur 1 ICT-kompakterare

Med ICT-testet var tanken få ett numeriskt värde för kompaktering (i viss mån motsvarande omformningstal), och samtidigt få en uppfattning om betongen fortfarande ger bra yta utan separation i form av vätska i det färdiga provet. Syftet var också att göra ett försök till att ge värden på god kompakterbarhet för så pass styv betong inför utläggning i fält.

För den härdade betongen provades tryckhållfasthet, spräckhållfasthet och frostbeständighet, men framför allt Prall som är ett mått på slitage. Då det inte finns några klara samband mellan betongens hållfasthetsegenskaper (som normalt provas) och slitage och för att inte behöva prova alla recept för Prall valdes de ut med högst spräckhållfasthet. Spräckhållfastheten ger ett indirekt värde för draghållfastheten och draghållfastheten borde rimligen ge information om betongens förmåga att motstå krafter som sliter isär kornen från pastan. De recept som hade högst spräckhållfasthet valdes ut för en första Prallprovning (efter 28-35d) vilket tillsammans med den färska betongens egenskaper fick bli vägledande för vidare provning.

Första provomgången gav också svar på vilken nivå som stenhalt ska ligga på, vilken till slut landade på 60%, mer än så upplevdes betongen som "risig" (håller ej ihop, ej smidig) och svårjobbad. Slutligen gjordes en första provning av luftens inverkan på betongens slitage. Luft blandades därför in i två recept för att se hur det påverkade spräckhållfasthet och Prall.

Totalt provades 17 olika blandningar i labomgång 1. Utifrån resultaten valdes sedan 2 stenmaterial/täkter ut för vidare provning i labomgång 2. I denna omgång var tanken att optimera blandningarna med avseende på cementhalt men även följande parametrar varierades:

- Vct: 0,33-0,38 med anpassad cementhalt.
- Med och utan silika
- Högre innehåll av sten (>60%), där det fortfarande ansågs möjligt.
- Naturgrus och stenmjöl, där majoriteten av blandningarna gjordes med naturgrus. Stenmjöl provades för att se om en märkbar skillnad kunde ses i det slutliga Prallvärdet.

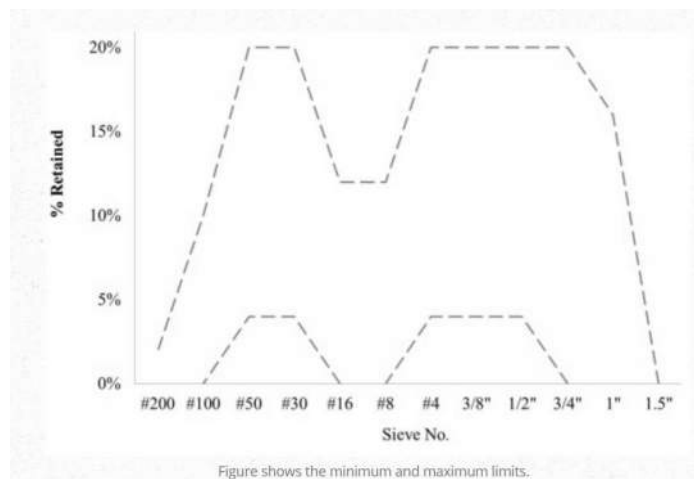
Bedömningen från labomgång 2 gjordes på samma sätt med som för labomgång 1 men med skillnaden att Prallproverna gjordes efter en längre tids härdning, 100-105 dagar istället för 28-35 dagar. Totalt gjordes i labomgång 2 totalt 15 blandningar.

I omgång 3 provades recept framtagna på CBI/Rise i ett tidigare SBUF-projekt. Tanken var att jämföra dessa med de framtagna i omgång 1 och 2 för att se om något kunde tas med till vidare provning. I dessa recept användes material med lite filler vilket gjorde att cementåtgången minskade.

I labomgång 4 användes resultaten från labomgång 2 och tanken var att försöka ”pressa” fram ännu högre tryck- och spräckhållfasthet för att se effekten på slitaget genom följande variationer:

- Något mer sten där det ansågs möjligt samt försök även till att täppa igen partikelsprång med mellanfraktioner.
- Lägre vct, 0,33-0,35
- Fler recept med lufttillsättning.
- Med ytterligare silika för att stärka upp cementpastan ytterligare.

I labomgång 5 användes erfarenheter från USA, där dimensioneringen av betongrecepten till betongvägarna baseras på den så kallade tarantellakurvan. Namnet kommer från att siktfordelningen ser ut som en tarantellaspindel (Figur B2), och är utvecklad/framtagna av Dr Tyler Ley vid Oklahoma State University.



Figur 2 Tarantellakurvan av Dr Tyler Ley [<http://www.tarantulacurve.com/>]

Siktkurvan har visat sig mycket framgångsrik i USA för att bygga hållbara betongvägar. De betongvägarna byggs dock för att tåla belastning över tid och inte för att tåla slitage på motsvarande sätt som i Sverige. Förslag på fördelning av stenmaterial erhöles från James Mack, Cemex, USA, tillika medlem i amerikanska betongvägsföreningen.

2.2. Provomgångar och stegvis analys av egenskaper

Labomgång nr 1

Från labomgång 1 valdes 2 material ut som kandidater för fortsatt provning i labomgång 2. Dessa var material från Hovgården och från Torphyttan. Den mest utslagsgivande parametern var slitstyrka uppmätt med Prall, arbetbarhet, cementåtgång (och framtida möjligheter att kunna sänka den), spräckhållfasthet och i mindre mån tryckhållfasthet. Torphyttan valdes framför allt för dessa egenskaper i den färska betongen i kombination med hög spräckhållfasthet.



Figur 3a och 3b packad cylinder från ICT och sättmått för Torphyttan

Bilden på sättmättet blir något missvisande för denna sättmåttssklass då den visar porigheter, varför ICT blev mer vägledande. "Känslan" som man går vidare med när man utför sättmått blir att antingen är betongen "mjuk" eller "stum". Med andra ord så är sättmättet för detta ändamål ett trubbigt sätt att mäta betongens konsistens/arbetbarhet

För de sämre betongkvaliteterna som varken kändes arbetbara eller kompakterbara för samma cementhalt märktes detta tydligt där en stor del ytor är fattiga på cementpasta och ingen förbättring sker i ytan med kompaktering, se figur B4a och B4b.



Figurer 4a och 4b Packad cylinder och sättmått för Skutskär

Den andra ballastkandidaten som valdes var Hovgården. Den gav något sämre intryck och värden än Torphyttan men receptgruppen kände ändå att av de övriga fanns det mest potential att jobba vidare med denna. Övriga togs bort då det tidigt ansågs ge för ”dålig” betong eller inte upplevdes uppfylla de uppställda kriterierna.

Labomgång nr 2

Baserat på resultat från omgång 1 varierade följande parametrar i omgång 2:

- Vct: 0,33-0,37 (med anpassning av cementhalten)
- Med och utan silika
- Högre nivåer på sten (>60%)
- Naturgrus och stenmjöl
- Med och utan tillsatt luft.

Från denna provomgång bedömdes 2 recept kunna gå vidare för provning i PVM, 4H-2L och 5H-2L. Båda recepten innehöll silika och en lufttillsättning för att kunna klara saltfrost.

Labomgång nr 3

I omgång 3 provades igen recept framtagna på CBI/Rise i ett tidigare projekt [2019, Moderna betongbeläggningar, M. Gustavsson, L. Kraft, U. Olofsson] Även om dessa gav en god inblick avseende hur eventuellt cementinnehåll kan minskas genom fillerfattiga material gav de dock inga större förbättringar/skillnader jämfört med recept från omgång 1-2 och de bedömdes vara något svåra att tillämpa på grund av de väldigt snäva fraktionerna som kan vara svåra att uppnå i full produktion. Därför valdes inget av dessa recept för vidare tester i PVM.

Labomgång nr 4

Från labomgång 4 var det 2 recept som valdes ut: 5F-3L och 5F-4L

Recepten valdes baserat på att de gav bäst resultat avseende Prall i kombination med lufttillsättning för att kunna klara saltfrost. Arbetbarheten var bland de sämre men de ansågs ändå att goda slitageegenskaper var viktigare med befintliga material, därav användningen av stenmjöl som kommer att få en än större roll i betongtillverkningen. Labomgång 4 hade även ett recept med baskarpsand och naturgrus men det gav högre slitage och valdes därför bort.

Labomgång nr 5

Labomgång 5 fokuserade mer på erfarenheter från betong till betongvägar i USA, där det utgicks ifrån den s k Tarantellakurvan. Svenska/Europeiska standardmått för siktar skiljer sig från de amerikanska som dessutom använder inches och för att få en någorlunda korrelation erhöles hjälp av en någorlunda översättning. Principen är dock att täppa igen så många partikelsprång som möjligt. En stor skillnad mot USA är att i USA används vct kring 0,45, receptgruppen valde dock att utgå från ett vct kring 0,38 för att uppfylla villkoren för exponeringsklasser XD3/XF4. Det valda receptet hade benämningen 5O.

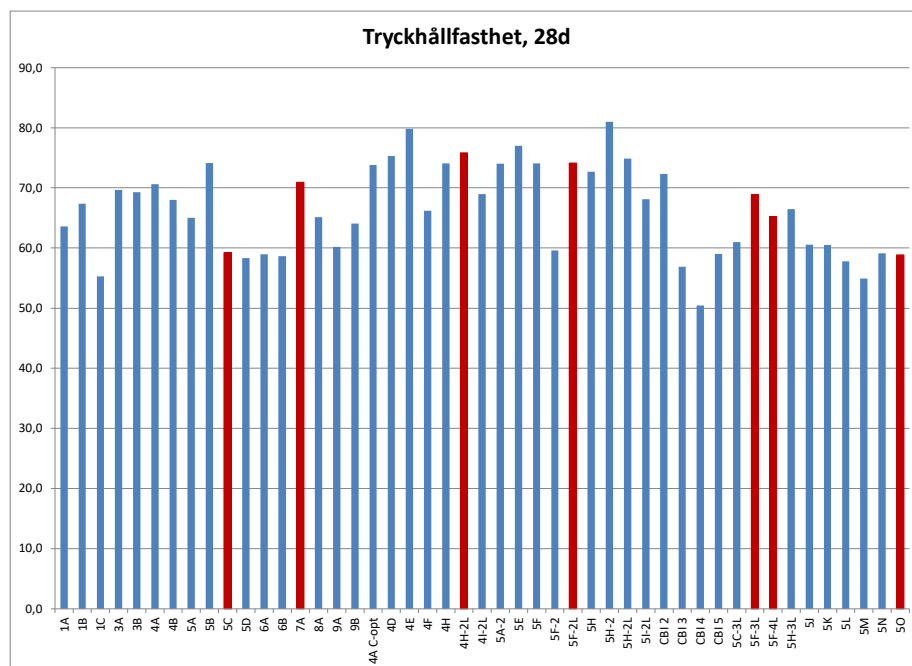
3. Resultat

Totalt bedömdes 6 recept intressanta för vidare provning i provvägsmaskin, det kan sammanfattas i nedan tabell.

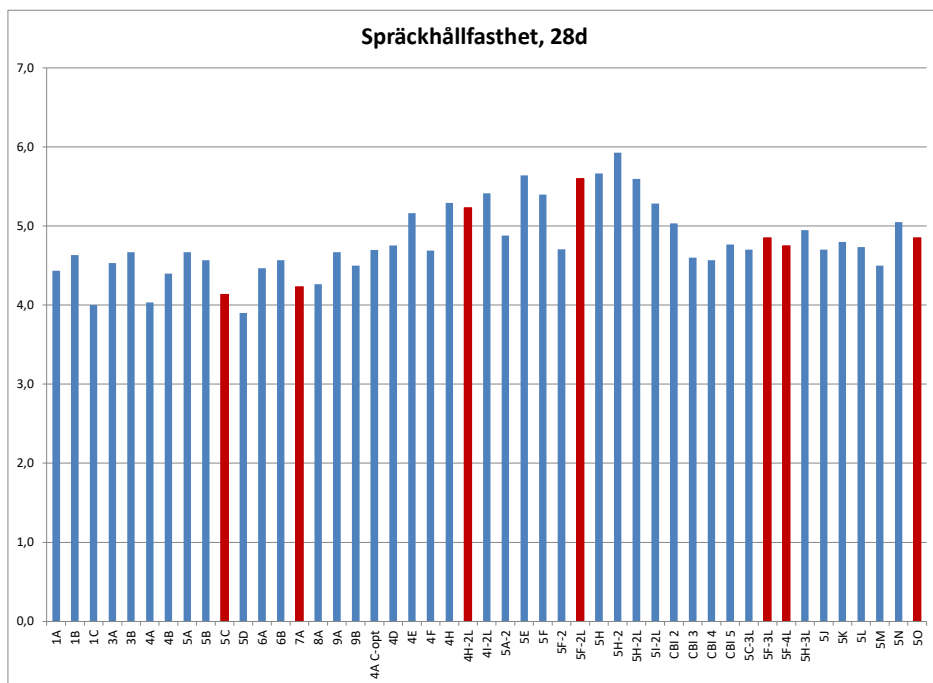
Tabell 1 Utvalda recept för vidare provning

omgång 1			omgång 2			omgång 4			omgång 5		
Blandning nr	5C	7A	Blandning nr	4H-2L	5H-2L	Blandning nr	5F-3L	5F-4L	Blandning nr	5O	
Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Enhöma 11-16 ref	Stenmaterial	Hogården 11-16	Torphyttan 11-16	Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Stenmaterial	Torphyttan 11-16	
ict	0,37	0,37	ict	0,33	0,37	ict	0,33	0,35	ict	0,38	
Anl FA	400	400	Anl FA	390	390	Anl FA	390	380	Anl FA	360	
Vatten	148	148,0	Vatten	132	132	Vatten	136	136	Vatten	137	
Flyt Sika RMC 320	0,40%	0,60%	Silika Emsac 500E	15	15	Silika Emsac 500E	45	15	Flyt Sika Viskocrete 3040 WG	0,20%	
Flyt Micro Air	0,50%	-	Flyt Sika RMC 320	0,90%	0,90%	Flyt Sika Viskocrete RMC 320	0,30%	0,12%	Flyt Micro Air (10%)	0,50%	
Grushalt Riksten 0-8 NK	40%	40%	Grushalt Riksten 0-8 NK	40%	40%	Luft Micro Air (10%)	0,60%	0,50%	Riksten 0-8 NK	-	
Stenhalt	60%	60%	Glads 0-4 K	-	-	Riksten 0-8 NK	-	-	Torphyttan 0-4	40,0%	
			Torphyttan 0-4	-	-	Baskap S95	-	-	Jehander 4-8	10,0%	
			Stenhalt	60%	60%	Torphyttan 0-4	37,0%	27,0%	Torphyttan 8-11	25,0%	
						Jehander 4-8	-	10,0%	Torphyttan 11-16	25,0%	
						Torphyttan 11-16	63,0%	63,0%			
Färska egenskaper			Färska egenskaper			Färska egenskaper			Färska egenskaper		
Sättningsmätt, mm	10	5	Sättningsmätt, mm	5	10	Sättningsmätt, mm	5	5	Sättningsmätt, mm	20	
Densitet, kg/m ³	2370	2460	Densitet, kg/m ³	2390	2400	Densitet, kg/m ³	2360	2400	Densitet, kg/m ³	2410	
Lufthalt, %	3,5	2,3	Lufthalt, %	3,2	3,0	Lufthalt, %	3,4	2,7	Lufthalt, %	3,1	
Kompakterbarhet, ICT			Kompakterbarhet, ICT			Kompakterbarhet, ICT			Kompakterbarhet, ICT		
Skärkraft vid 10 cykler	62	83	Skärkraft vid 10 cykler	51	64	Skärkraft vid 10 cykler	17	84	Skärkraft vid 10 cykler	-	
Kommentar	Lättkompakterad		Kommentar	Fattas pasta	Bra	Kommentar	Kladdig	Lite tsg	Kommentar		
Tryckhållfasthet, 7d			Tryckhållfasthet, 28d			Tryckhållfasthet, 28d			Tryckhållfasthet, 28d		
1	43,5	53,1	1	75,8	77,6	1	69,8	66,3	1	58,1	
2	46,1	55,4	2	74,7	75	2	68,6	62,2	2	62,2	
3	44,1	54,2	3	77	71,9	3	68,2	67,2	3	56,2	
Medel	44,6	54,2	Medel	75,8	74,8	Medel	68,9	65,2	Medel	58,8	
Tryckhållfasthet, 28d			Spräckhållfasthet, 28d			Spräckhållfasthet, 28d			Spräckhållfasthet, 28d		
1	57,9	71,6	1	5,4	5,4	1	4,5	4,8	1	4,7	
2	60,6	71,4	2	5,3	5,5	2	5,2	4,7	2	5	
3	59,1	69,7	3	5,1	5,8	3	4,9	4,8	3	-	
Medel	59,2	70,9	Medel	5,2	5,6	Medel	4,9	4,8	Medel	4,9	
Spräckhållfasthet, 28d			Tryckhållfasthet, 56d			Prall			Tryckhållfasthet, 56d		
1	4,0	4,4	1	78,4	81,8	1	18,0	16,3	1		
2	4,1	4,2	2	79,5	86,4	2	17,2	16,4	2		
3	4,3	4,1	3	86,1	82,4	3	18,2	18,1	3		
Medel	4,1	4,2	Medel	81,3	83,5	4	22,9	16,9	Medel		
Prall, 100-35d			Prall, 100-105d			Medel	19,1	16,9	Prall		
1	23,9	29	1	23,1	20,3	7 cykler	0,00	0,01	1	24,6	
2	19,5	29,9	2	21,8	17,4	14 cykler	0,01	0,01	2	21,7	
3	21,9	31,9	3	22,1	18,5	28 cykler	0,01	0,02	3	23,4	
4	18,9	31,4	4	21,1	19,4	42 cykler	0,01	0,04	4	21,3	
Medel	21,1	30,6	Medel	22,0	18,9	56 cykler	0,01	0,04	Medel	22,8	
Frostbeständighet			Frostbeständighet						Frostbeständighet		
14 cykler	0,01		7 cykler	0,01					7 cykler	0,01	
28 cykler	0,01		14 cykler	0,03					14 cykler	0,02	
56 cykler	0,01		28 cykler	0,06					28 cykler		
			42 cykler	0,08					42 cykler		
			56 cykler	0,10					56 cykler		

Totalt kan resultaten sammanfattas enligt nedan grafer där de rödmarkerade har valts ut till vidare provning i provvägsmaskin (PVM). Motivering till urvalet i avsnitt 4.

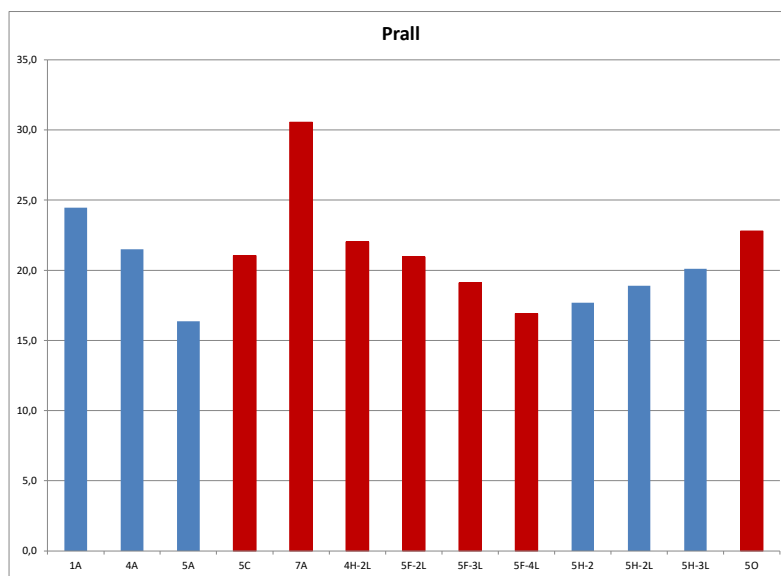


Figur 5 Tryckhållfasthet efter 28 dygn



Figur 6 Spräckhållfasthet efter 28 dygn

I figur B7 nedan presenteras resultatet från de framtagna Prallprovningarna, där lågt Prall-värde är gynnsamt (motivering enligt nedan avsnitt 4 nedan).



Figur 7 Prall-värden för de olika recepten

4. Diskussion / val för recept för vidare provning i PVM

Vid valet av recept till vidare provning i PVM skulle totalt 7 recept provas och för varje recept tillverkades 4 provplattor som placerades i en ring på vilken ett däck rullar på i ett antal varv där sen slitaget mäts. Med undantag för recept 7A har samtliga recept valts utifrån goda Prall-värden men även

saltfrostegenskaper har varit en viktig parameter. Där det har varit någorlunda likvärdigt Prall har i stället urvalskriterierna varit produktionsvänlighet och miljö (cementhalt/CO₂) men även tillsättningar av olika delmaterial för att se hur det slår på slutresultatet. Följande recept med motiveringar valdes:

1. 5C: Ett recept med bra Prall och utan silika och relativt högt vct
2. 4H-2L: Ballast från Hovgården med luft och silika. Alternativ till Torphyttan. Bästa resultatet från Hovgården
3. 5H-2L: ett av de bästa recepten med avseende på Prall
4. 5F-3L: Bra värde (<20) med mycket lågt vct och mkt silika, samt stenmjöl
5. 5F-4L: Bästa resultatet med avseende på Prall, mindre partikelsprång med stenmjöl, moderat cementhalt
6. Referens med dåligt Prall-värde.
7. 5O: Amerikanskt utgångsrecept med bra Prall-värde och relativt god arbetbarhet. Så få partikelsprång som möjligt, ingen silika och låg cementhalt

Urvalet har varit komplicerat då det jämfört med andra betongegenskaper har varit komplext att avgöra hur de olika parametrarna påverkar slitaget på ett positivt eller negativt sätt. Förutom de tekniskt mätbara parametrarna som Prall, tryckhållfasthet och spräckhållfasthet har även urvalet baserats på expertbedömningar av vad som är rimligt att kunna producera så bra och så realistiskt som möjligt med så liten miljöpåverkan som möjligt.

Recept 5C valdes pga dess väldigt låga Prall-värde, dvs bra förmåga att motstå slitage men det fick bli någon form av referens/utgångsläge för ett bra recept med så få tillägg, ändringar, optimeringar som möjligt. Det som kännetecknade 5C var förutom den höga stenandelen var dess mycket goda kompakterbarhet/ arbetbarhet. 5C är också ”syster” till recept 5A som hade bl a det bästa Prall-värdet men det var en betong utan luft.

Recept 4H-2L var ett recept med en stenandel på 60% från Hovgården, med ett lägsta vct på 0,33 och med silika. Även om det troligen krävs något mer cement för bättre kompaktering är det ett lovande material och lovande recept med ett lågt Prall-värde på runt 22.

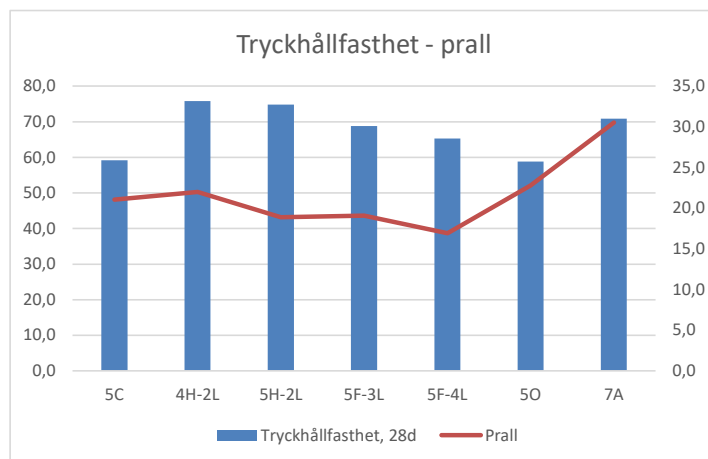
De tre recepten 5H-2L, 5F-3L och 5F-4L är alla med material från Torphyttan med vct 0,33-0,37 och som hade de tre bästa Prallvärdena. 5F-3L och -4L får anses vara mer extrema med helkross och höga stenhalter på runt 63% och cementhalter ej överstigande 390kg vilket får anses bra med tanke på det låga vct-värdet. Troligen får detta justeras upp något för att få en bättre arbetbarhet vid full skala men det bedömdes inte vara mycket.

Att jobba med de amerikanska recepten var däremot väsensskilt med tanke på den lägre stenhalten vilket fick ett enormt negativt genomslag på Prallvärdet. Däremot är det mycket troligt att så få partikelsprång som möjlig är gynnsamt för slitaget (vilket också till viss del sågs i recept 5F-4L) men med facit i hand skulle nog detta gjorts med en stenhalt ej understigande 60% för att få tillräckligt bra Prall-värde.

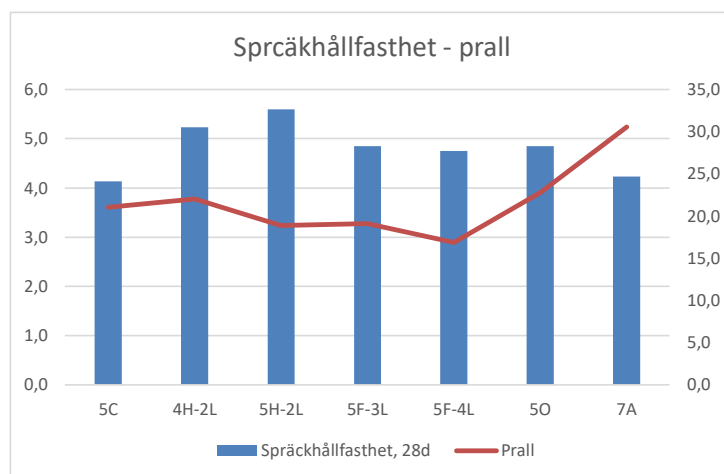
Några kommentarer kan göras kring de olika delmaterialen. Gällande krossmaterial har projektet kunnat visa att bra slitage inte är beroende av runda fina korn utan kross kan mycket väl fungera som ett bra delmaterial i betongmassan. Likt ”vanlig” betongreceptframtagning krävs en anpassning av cementpastan efter yta för att få så god kompaktering som möjligt men den är inte beroende av rörelse på samma sätt som för en vanlig betong. Användning av kross har dock varit ett av målen för receptgruppen för att betongen ska få så hög miljöprofil som möjligt för att betongväg ska kunna vara ett bra alternativ till asfalt i framtiden.

Vidare har receptgruppen i detta projekt använt sig av silika för att få en bättre/starkare cementpasta. Man kan fråga sig om det var klokt med tanke på den större närvaron av slagg på marknaden. Det är givetvis en relevant poäng och receptgruppen hade gärna sett att slagg funnits med i receptutvecklingen. Men i detta fall ansågs silika effektivare med den lilla mängd som användes. Det hade dock varit intressant och relevant att ta med slagg och andra möjliga puzzolaner vid en fortsättning.

Gällande de olika sambanden mellan olika parametrar var det svårt att hitta ett entydigt sådant som tydde på att det gav ett högt eller lågt Prall-/slitagevärde. I graferna nedan för tryckhållfasthet respektive spräckhållfasthet i kombination med Prall kan inga direkta samband urskiljas. Möjligen finns tendenser till samband mellan spräckhållfasthet och Prall och det var de tendenserna som var utgångspunkten vid den första filtreringen, från labomgång 1 till labomgång 2 (se även graf i figur B8)



Figur 8 Tryckhållfasthet och Prall för de olika recepten.

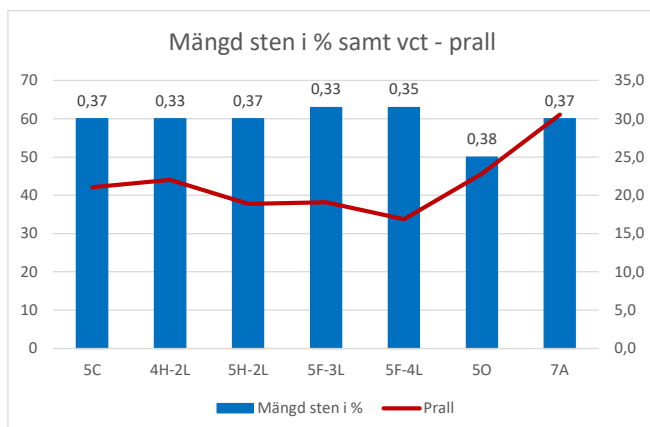


Figur 9 Spräckhållfasthet och Prall för de olika recepten.

De enskilda viktigaste parametrarna för lågt Prall-värde är lågt kulkvarnsvärde i kombination med:

- "Tillräckligt" lågt vct med tillräcklig mängd pasta
- Hög stenhalt, gärna över 60%
- God vibration

Nedanstående graf visar Prall tillsammans med stenhalt och vct



Figur 10 Stenhalt, vct och Prall. Siffrorna vid staplarna anger vct.

Vad gäller den färiska betongen och resultat från ICT kunde ses en viss relation mellan skärkraften och kompakterbarheten men framför allt bekräftades den känslan när man väl höll på med betongen för hand. Om en betong kunde upplevas "risig" (håller ej ihop, ej smidig) vid mätning av sättmått återspeglades det även i ICT. För de mindre arbetbara betongerna blev skärkraften högre och slutresultatet för den kompakterande cylindern blev också mycket tydlig med håligheter. Nedan foton visar på en jämförelse mellan ett bättre och ett sämre prov i ICT.



Figur 10a Ett prov med god kompakterbarhet i ICT



Figur 10b Ett prov med sämre kompakterbarhet i ICT

En fördel med att använda så pass styva betonger i detta läge var att det gav ett snabbt svar på vilka material som krävde mer energi och mer cement för att erhålla en betong som skulle kunna fungera till vägbetong.

Som jämförelse kan nämnas att i USA används ett s k box-test för att bedöma kompakterbarheten. Den innebär att en låda med speciella mått fylls med betong och en vibratorstav förs långsamt ner och upp under en viss tid. Efter avformning görs en bedömning på ytorna, se figurer nedan.

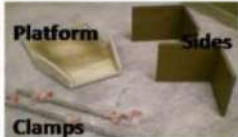
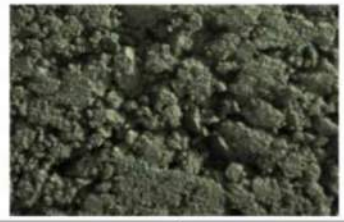
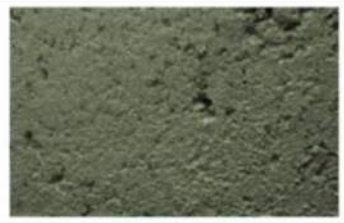
	Step 1	Gather the different components of the Box Test.
	Step 2	Construct box and place clamps tightly around box. Hand scoop mixture into box until the concrete height is 9.5" (241.3 mm).
	Step 3	Insert vibrator downward for 3 seconds and upward for 3 seconds. Remove vibrator.
	Step 4	After removing clamps and the forms, inspect the sides for surface voids and edge slumping.

Table 1. Steps of the Box Test

Figur 11 Utförande av boxtest [<http://www.tarantulacurve.com/>]

	
4 Over 50% overall surface voids.	3 30-50% overall surface voids.
	
2 10-30% overall surface voids.	1 Less than 10% overall surface voids.

Figur 12 Bedömning av ytor enligt boxtest [<http://www.tarantulacurve.com/>]

5. Plattorna som tillverkades

Från de ovan presenterade recepten har ett antal plattor tillverkats för vidare provning i provvägsmaskinen (PVM). De gjordes i en labblandare på Cementas lab i Slite, Gotland.

Efter blandning och gjutning påfördes ytretarder för att nästa dag kunna spola rent ytan från cementskiv och sten friläggas. Se bilder nedan.



Figur 13 Tillverkning av betongplattor på Cementa Researchs lab i Slite



Figur 14 Samtliga plattor behandlades med ytretarder så att cementskiv tvättades bort och sten kunde friläggas.

6. Slutsatser

- Störst inverkan på slitage hade stenens hårdhet samt mängd.
- Troligen bör mängden sten ej understiga 60%
- Luften hade stor inverkan på slitaget (jämför t ex recept 5A med 5C)
- Tryckhållfastheten hade ingen påverkan på slitage.
- Spräckhållfasthet hade liten påverkan på slitage

7. Bilaga: Samtliga provningar

Labomgång nr 1

Blandning nr	1A	1B	1C	3A	3B	4A	4B
Stenmaterial	Durasplit 11-16	Durasplit 11-16	Durasplit 11-16	Skutskär 11-16	Skutskär 11-16	Hoggården 11-16	Hoggården 11-16
vct	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Anl FA	400	390	400	400	390	400	390
Vatten	148,0	144,3	148	148,0	144,3	148,0	144,3
Flyt Sika RMC 320	0,60%	0,70%	0,50%	0,60%	0,70%	0,60%	0,70%
Luft Micro Air	-	-	0,50%	-	-	-	-
Grushalt Riksten 0-8 NK	40%	35%	40%	40%	35%	40%	35%
Stenhalt	60%	65%	60%	60%	65%	60%	65%
Färska egenskaper							
Sättnått, mm	10	10	10	5	5	10	10
Densitet, kg/m ³	2430	2470	2410	2430	2430	2410	2430
Lufthalt, %	1,5	1,5	3,6	1,9	1,8	1,8	2,0
Kompakterbarhet, ICT							
Skärkraft vid 10 cykler	58	92	32	57	64	67	83
Kommentar							
Tryckhållfasthet, 7d							
1	45,5	54,2	45,4	50,5	52,2	54,5	53,6
2	54,3	52,2	44	51	57	53,8	56
3	49,8	50,8	44,9	56,3	54,7	53	50,9
Medel	49,9	52,4	44,8	52,6	54,6	53,8	53,5
Tryckhållfasthet, 28d							
1	66,2	70,1	54	64,3	68,7	71,8	64,7
2	64,4	69,3	57,7	71,7	68,7	71,7	72,4
3	60,1	62,7	54,1	73,0	70,4	68,3	67,0
Medel	63,6	67,4	55,3	69,7	69,3	70,6	68,0
Spräckhållfasthet, 28d							
1	4,5	4,6	3,8	4,8	4,8	4,0	4,4
2	4,5	4,7	3,9	4,3	4,8	4,3	4,1
3	4,3	4,6	4,3	4,5	4,4	3,8	4,7
Medel	4,4	4,6	4,0	4,5	4,7	4,0	4,4
Prall, 28-35d							
1	23,9					24,3	
2	26,4					18,9	
3	23,4					23,3	
4	24,2					19,5	
Medel	24,5					21,5	
Frostbeständighet							
14 cykler			0,01				
28 cykler			0,01				
56 cykler			0,02				

Blandning nr	5A	5B	5C	5D	6A	6B	7A
Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Orsa 11-16	Orsa 11-16	Enhöma 11-16 ref
vct	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Anl FA	400	390	400	390	400	390	400
Vatten	148,0	144,3	148	144,3	148,0	144,3	148,0
Flyt Sika RMC 320	0,60%	0,70%	0,40%	0,60%	0,60%	0,70%	0,60%
Luft Micro Air	-	-	0,50%	0,50%	-	-	-
Grushalt Riksten 0-8 NK	40%	35%	40%	35%	40%	35%	40%
Stenhalt	60%	65%	60%	65%	60%	65%	60%
Färska egenskaper							
Sättnått, mm	10	5	10	10	5	1	5
Densitet, kg/m ³	2410	2430	2370	2380	2430	2440	2460
Lufthalt, %	2,1	1,6	3,5	3,4	2,0	1,4	2,3
Kompakterbarhet, ICT							
Skärkraft vid 10 cykler	53	79	62	56	91	78	83
Kommentar	Lättkompakterad	Lättkompakterad	Lättkompakterad	Lättkompakterad	Mycket risig	Mycket risig	
Tryckhållfasthet, 7d							
1	53,4	53,3	43,5	46	44,1	47,9	53,1
2	54,5	59	46,1	39,2	41,4	49,5	55,4
3	53,1	58,5	44,1	47	45,1	50,7	54,2
Medel	53,7	56,9	44,6	44,1	43,5	49,4	54,2
Tryckhållfasthet, 28d							
1	71	70	57,9	56,8	61,0	61,7	71,6
2	60,5	76,6	60,6	58,6	58,6	54,4	71,4
3	63,5	75,8	59,1	59,6	57,2	59,8	69,7
Medel	65,0	74,1	59,2	58,3	58,9	58,6	70,9
Spräckhållfasthet, 28d							
1	4,5	4,5	4,0	4,1	4,6	4,5	4,4
2	5,0	4,7	4,1	3,8	4,6	4,6	4,2
3	4,5	4,5	4,3	3,8	4,2	4,6	4,1
Medel	4,7	4,6	4,1	3,9	4,5	4,6	4,2
Prall, 28-35d							
1	16,6		23,9				29
2	15,4		19,5				29,9
3	14,6		21,9				31,9
4	18,9		18,9				31,4
Medel	16,4		21,1				30,6
Frostbeständighet							
14 cykler			0,01				
28 cykler			0,01				
56 cykler			0,01				

Labomgång nr 2

Blandning nr	4A C-opt	4D	4E	4F	4H	4H-2L	4I-2L	5A-2
Stenmaterial	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Hovgården 11-16	Torphyttan 11-16
vct	0,37	0,36	0,33	0,37	0,37	0,33	0,33	0,36
Anl FA	390	390	420	390	370	390	390	390
Vatten	144	140	139	144	140	132	131	140,5
Silika Emsac 500E					15	15	15	
Flyt Sika RMC 320	0,70%	0,80%	1,00%	0,80%	0,80%	0,90%	1,10%	0,70%
Luft Micro Air	-	-	-	-	-	0,50%	0,60%	-
Grushalt Riksten 0-8 NK	40%	40%	40%	-	40%	40%		40%
Gladö 0-4 K				40%			38%	
Torphyttan 0-4								
Stenhalt	60%	60%	60%	60%	60%	60%	62%	60%
Färska egenskaper								
Sättnått, mm	10	0	5	?	10	5	5	5
Densitet, kg/m3	2400	2400	2410	2400	2420	2390	2390	2420
Lufthalt, %	2,3	2,3	2,3	2,5	2,3	3,2	3,6	1,8
Kompakterbarhet, ICT								
Skärkraft vid 10 cykler	80	79	57	80	51	51	77	71
Kommentar	OK	OK	Svärkompakterad	Kärn/seg		Fattas pasta	Svärkompakterad	Ok

Tryckhållfasthet, 28d								
1	73,2	69,3	80,3	67,8	67,5	75,8	69	71,7
2	73,1	79,3	73,4	64,1	76,1	74,7	69,2	75,5
3	75,2	77,2	85,7	66,7	78,6	77	68,7	74,9
Medel	73,8	75,3	79,8	66,2	74,1	75,8	69,0	74,0
Spräckhållfasthet, 28d								
1	4,6	4,6	5,0	4,3	5,4	5,4	5,3	4,8
2	4,7	4,6	5,3	5,0	5,5	5,3	5,6	4,9
3	4,8	5,1	5,1	4,7	5,1	5,1	5,4	4,9
Medel	4,7	4,8	5,2	4,7	5,3	5,2	5,4	4,9
Tryckhållfasthet, 56d								
1	83,2	78,8	90,2	72,5	76,6	78,4	77,3	74,6
2	63,0	83,0	93,6	69,5	86,9	79,5	70,1	80,8
3	72,6	84,7	92,4	73,7	84,8	86,1	74,7	72,1
Medel	72,9	82,2	92,1	71,9	82,8	81,3	74,0	75,8
Prall, 100-105d								
1						23,1		
2						21,8		
3						22,1		
4						21,1		
Medel						22,0		
Frostbeständighet								
7 cykler			0,04			0,01	0,02	
14 cykler			0,09			0,03	0,04	
28 cykler			0,16			0,06	0,06	
42 cykler			0,18			0,08	0,08	
56 cykler			0,22			0,10	0,08	

Blandning nr	5E	5F	5F-2	5F-2L	5H	5H-2	5H-2L
Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16
vct	0,33	0,37	0,37	0,33	0,37	0,35	0,37
Anl FA	420	390	390	390	370	390	390
Vatten	139	144	144	131	140	140	132
Silika Emsac 500E				15	15	15	15
Flyt Sika RMC 320	0,90%	0,80%	0,70%	0,70%	0,80%	0,90%	0,90%
Luft Micro Air	-	-	-	0,60%	-	-	0,50%
Grushalt Riksten 0-8 NK	40%		40%		40%	40%	40%
Gladö 0-4 K							
Torphyttan 0-4		40%		37%			
Stenhalt	60%	60%	65%	63%	60%	60%	60%
Färska egenskaper							
Sättnått, mm	5	10	-	-	10	5	10
Densitet, kg/m3	2450	2430	-	2440	2420	2420	2400
Lufthalt, %	-	2,0	-	3,5	2,1	2,2	3,0
Kompakterbarhet, ICT							
Skärkraft vid 10 cykler	67	80	-	-	69	55	64
Kommentar		Kletig men bra		Bra		Bra	Bra

Tryckhållfasthet, 28d							
1	76,9	70,8	57,6	77,1	74,8	82,8	77,6
2	76,6	74,5	60,1	75,2	74,4	80,1	75
3	77,5	76,9	61,1	70,1	68,9	80	71,9
Medel	77,0	74,1	59,6	74,1	72,7	81,0	74,8
Spräckhållfasthet, 28d							
1	5,5	5,3	4,8	5,5		5,8	5,4
2	5,9	5,5	4,6	5,7	5,8	6,1	5,5
3	5,5	5,5	4,6	5,6	5,5	5,9	5,8
Medel	5,6	5,4	4,7	5,6	5,7	5,9	5,6
Tryckhållfasthet, 56d							
1	91,7	85,7	66,4	85,5	80,3	84,6	81,8
2	84,8	85,4	63,4	87,3	84,7	87,7	86,4
3	82,4	83,2	63,9	80,4	77,5	83,0	82,4
Medel	86,3	84,8	64,6	84,4	80,8	85,1	83,5
Prall, 100-105d							
1				21,3		24,2	20,3
2				22,1		16,5	17,4
3				21,1		15,8	18,5
4				19,3		14,2	19,4
Medel				21,0		17,7	18,9
Frostbeständighet							
7 cykler	0,01			0,01	0,01	0,05	
14 cykler	0,07			0,02	0,07	0,06	
28 cykler	0,19			0,04	0,08	0,09	
42 cykler	0,20			0,06	0,10	0,09	
56 cykler	0,22			0,07	0,11	0,10	

Labomgång nr 3

Blandning nr	CBI 2	CBI 3	CBI 4	CBI 5
Tillverkningsdatum	2019 02 04	2019 02 04	2019 02 04	2019 02 21
Stenmaterial	Hoggården 8-11	Hoggården 8-11	Torphyttan 11-16	Hoggården 8-11
vct	0,36	0,36	0,36	0,36
Anl FA	373	373	373	361
Vatten	135,4	135,4	135,4	130
Flyt Sika Viskocrete 3040 W	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%
Sika Retarder	0,30%	0,30%	0,30%	0,30%
Luft Micro Air	0,60%	0,60%	0,60%	0,30%
Dalboda 0.2-1	29,4%	29,4%	29,4%	29,3%
Hoggården 2-5	10,6%	10,6%	10,6%	10,7%
Stenhalt	60,0%	60,0%	60,0%	60,0%
Färska egenskaper				
Sättnått, mm	5	5	10	5
Densitet, kg/m3	2400	2310	2340	2370
Lufthalt, %	2,7	4,8	4,8	3,8
Kompakterbarhet, ICT				
Skärkraft vid 10 cykler	88	82	67	84
Kommentar				

Tryckhållfasthet, 7d				
1	56,7	42,6	40,1	42,6
2	56,0	41,7	34,6	41,8
3	57,1	43,4	37,9	46,7
Medel	56,6	42,5	37,5	43,7
Tryckhållfasthet, 28d				
1	69,0	54,6	52,0	59,0
2	74,4	56,2	50,3	60,3
3	73,5	59,8	49,0	57,8
Medel	72,3	56,9	50,4	59,0
Spräckhållfasthet, 7d				
1	4,1	3,8	3,6	3,8
2	4,3	3,8	3,7	-
3	4,2	3,8	3,9	-
Medel	4,2	3,8	3,7	3,8
Spräckhållfasthet, 28d				
1	5,0	4,6	4,8	4,4
2	5,1	4,4	4,5	4,9
3	5,0	4,8	4,4	5,0
Medel	5,0	4,6	4,6	4,8
Prall, 28-35d				
1				
2				
3				
4				
Medel				
Frostbeständighet				
14 cykler				
28 cykler				
56 cykler				

Labomgång nr 4

Tillverkningsdatum	2019 05 20	2019 05 20
Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16
vct	0,33	0,35
Anl FA	390	380
Vatten	136	136
Silika Emsac 500E	45	15
Flyt Sika Viskocrete RMC 320	0,30%	0,12%
Luft Micro Air (10%)	0,60%	0,50%
Riksten 0-8 NK	-	-
Baskarp S95	-	-
Torphyttan 0-4	37,0%	27,0%
Jehander 4-8	-	10,0%
Torphyttan 11-16	63,0%	63,0%
Färska egenskaper		
Sättnått, mm	5	5
Densitet, kg/m3	2360	2400
Lufthalt, %	3,4	2,7
Kompakterbarhet, ICT		
Skärkraft vid 10 cykler	17	84
Kommentar	Kladdig	Lite risig

Tryckhållfasthet, 28d		
1	69,8	66,3
2	68,6	62,2
3	68,2	67,2
Medel	68,9	65,2
Spräckhållfasthet, 28d		
1	4,5	4,8
2	5,2	4,7
Medel	4,9	4,8
Prall		
1		
2		
3		
4		
Medel		
Frostbeständighet		
7 cykler	0,00	0,01
14 cykler	0,01	0,01
28 cykler	0,01	0,02
42 cykler	0,01	0,04
56 cykler		

Labomgång nr 5

Blandning nr	5J	5K	5L	5M	5N	5O
Tillverkningsdatum	2019 06 24	2019 06 24	2019 06 24	2019 06 24	2019 06 24	2019 06 24
Stenmaterial	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16	Torphyttan 11-16
vct	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Anl FA	360	360	350	360	370	360
Vatten	137	137	133	137	140,5	137
Flyt Sika Viskocrete 3040 WQ	0,30%	0,35%	0,43%	0,30%	0,35%	0,20%
Luft Micro Air (10%)	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%
Riksten 0-8 NK	-	-	54,0%	55,0%	-	-
Torphyttan 0-4	54,0%	54,0%	-	-	55,0%	40,0%
Jehander 4-8	-	-	-	11,0%	11,0%	10,0%
Torphyttan 8-11	16,0%	22,0%	22,0%	13,0%	13,0%	25,0%
Torphyttan 11-16	30,0%	24,0%	24,0%	21,0%	21,0%	25,0%
Färska egenskaper						
Sättnatt, mm	20	20	20	20	15	20
Densitet, kg/m3	2380	2370	2380	2380	2380	2410
Lufthalt, %	4,0	4,4	4,1	4,4	4,1	3,1
Kompakterbarhet, ICT						
Skärkraft vid 10 cykler	-	-	-	-	-	-
Kommentar						
Tryckhållfasthet, 28d						
1	57,7	56,7	58,9	57,3	56,6	58,1
2	63,2	62,4	57,5	52,7	59,5	62,2
3	60,8	62,4	56,9	54,7	61,2	56,2
Medel	60,6	60,5	57,8	54,9	59,1	58,8
Spräckhållfasthet, 28d						
1	4,6	4,7	4,5	4,3	5,1	4,7
2	4,7	4,8	4,8	4,5	5	5
3	4,8	4,9	4,9	4,7	-	-
Medel	4,7	4,8	4,7	4,5	5,1	4,9
Tryckhållfasthet, 56d						
1						
2						
3						
Medel						
Prall						
1					27,6	24,6
2					27,4	21,7
3					26,0	23,4
4					24,4	21,3
Medel					26,4	22,8
Frostbeständighet						
7 cykler	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
14 cykler	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02
28 cykler	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,02
42 cykler	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
56 cykler	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02

Bilaga C: Materialtester KTH

Ulf Olsson, Institutionen för Maskinkonstruktion, KTH (R1&R2)

Yezhe Lyu, Institutionen för Maskinkonstruktion, KTH (R1&R2)

Lars Kraft, RISE (R2)

2019



**Nötning och luftburna nötningspartiklar från kontakten mellan dubbdäck och betongvägar –
en laboratoriestudie av fem vägbetongblandningar och två stenmaterial i en pinne-på-skiva
maskin**

Ulf Olofsson, Yezhe Lyu

Institutionen för Maskinkonstruktion KTH, SE 100 44 Stockholm, Sverige

Sammanfattning

Dubbdäckanvändning orsakar stora underhållskostnader för våra vägar. I en pinne-på-skiva maskin, placerad i ett renrum, studerades den glidande kontakten mellan dubbdäck och vägmateriäl. Totalt fem olika betongväg- och två rena stenmaterial provades mot ett dubbdäck (Nokian Hakkapeliitta 7). Den bortnötta massan, vägmaterialets hårdhet och antalet luftburna partiklar uppmättes. Resultaten visar att ett av betongvägmaterialet (med ballast från Torphyttan) uppvisar en signifikant lägre nötning i form av bortnött massa och även ett signifikant lägre antal genererade luftburna partiklar. Detta vägmateriäl var det materiäl som redovisade hårdast ballast. En reducering av normallasten mellan dubbdäck och vägmateriäl reducerar också i hög grad bortnött massa och antalet luftburna nötningspartiklar. Vid prov med de rena stenmaterialen uppvisas en jämförelsevis stor minskning av antalet luftburna partiklar medan den bortnötta massan var av samma storleksordning som de vägmateriäl som hade motsvarande ballasthårdhet som stenmaterialets hårdhet.

Nyckelord: nötning, luftburna partiklar, dubbdäck, vägbetong, sten

Abstract

The use of studded tyres causes large maintenance road maintenance costs. A pin-on-disc machine in a clean chamber was used to study the sliding contact between stubbed tyre and road materials. Totally five road and two pure stone materials were evaluated sliding against a studded tyre materials (Nokian Hakkapeliitta 7). Worn mass, concentration of airborne particles and the road material hardness were measured. The results show that one of the road materials (with stone from Torphyttan) shows a significant lower wear and particle concentration. A reduction of the normal load between studded tyre and road material also reduced the worn mass as well as the airborne particle concentration. For the pure stone materials, the airborne number concentration was significantly reduced although the worn mass was at similar level as for road materials with the same stone hardness level.

Keywords: wear, airborne particles, studded tires, road concrete, stone

Introduktion

Dubbdäck på svenska vägar sparar mellan 60 och 770 levnadsår i trafiken (Furberg et al [1]) pga. bättre väggrepp under vinterförhållanden. Enligt en studie från VTT [2], drar även de som kör med dubbfria vinterdäck nytta av dubbdäck eftersom dom gör vägbanan mer sträv, vilket gör att odubbade däck får bättre grepp. Användning av dubbdäck under vintermånaderna orsakar nötning av vägbanan vilket leder till kraftigt ökande underhållskostnader. Nötningen bidrar i sin tur också signifikant till mängden inandningsbara partiklar i stadsmiljön. En dubb till ett dubbdäck består av en aluminiumkärna, i vilken det sitter ett hårdmetallstift. Hårdmetallstiftet (vikt ca 0,2–0,4 g) är tillverkat av volframkarbid (WC-Co) innehållande upp till 10% kobolt. Användning av dubbdäck bidrar därmed till kobolt sprids i naturen. Kobolt är en metall som är svartlistad av hälsoskäl och fasas idag bort i många sammanhang. Noterbart är att det idag inte finns någon kravställning på dubbstiftens materiäl vad gäller tillåtna ämnen som kobolt eller materialegenskaper som hårdhet. Lagstiftningen begränsar dubbanvändningen: Från augusti 2013 är normallasten på en dubb begränsad till 120 N, dubbvikten till 1,1 g och utsticket till 1,2 mm i de nordiska länderna. Antalet dubbar är också begränsat till 50 i kontakt per rullad meter.

Betong är ett materiäl som består av bergmateriäl (ballast) sammanbundet av cementpasta. Tidigare laboriestudier på KTH [3] visar att hårdhetskillnaden mellan betongvägbansans slityta och dubbmaterialet påverkar vägslitage i hög grad. Ju större hårdhetskillnad, desto mer vägslitage. Antalet luftburna partiklar ökar också med en ökande hårdhetskillnad. Resultat är i överensstämmelse med fullskaleförsök presenterade i [4], där fyra olika vägmateriäl utvärderades, och ett klart samband mellan vägmaterialets sammansättning och dubbdäcksnötning kunde identifieras. En sammanfattning av fullskaleförsöken redovisade i [5] stödjer också resultaten. En jämförelse mellan ballast av kalksten och vulkanisk sten, visar att den hårdare vulkaniska stenen nöts mindre. En översikt från 2010 [6], visar att förutom hårdare ballast, så har mikrosilika använts framgångsrikt för att minska dubbdäcksnötning.

Kontakten mellan dubb och vägbana är en rullande och glidande kontakt, se [7]. Kontaktarean motsvarar arean hos en vuxen mans hand. Dubben kommer först i kontakt med vägbanan via ett stötförlopp därefter sker en glidande rörelse genom kontakten tills dubben lämnar vägbanan. Glidhastigheten beror på kryptet (den relativa hastighetsskillnaden mellan däck och vägbana i kontakten). Vid 30 m/s (100 km/h) är den relativa glidhastigheten i kontakten vid fri rullning typiskt runt 2 m/s, men detta värde kan variera inom kontaktarean [8]. Vid höga hastigheter dominerar nötningen av dynamiska förlopp när dubben kommer in i kontakten. Här är skademekanismerna slag och krossning. Vid låga hastigheter så dominerar nötningen av repning. I [9] används en fordonshastighet om 50 km/h, som skiljehastighet mellan dynamiskt förlopp och repande förlopp.

Det finns flera utrustningar som mäter nötningsmotståndet för vägmateriel. Två utrustningar som bygger på ansatsen att det är ett stötförlopp som står för nötningen är Prall och Tröger. I Prall vibreras kullagerkuler på vägytan, samtidigt som kallt vatten sköljer bort lösa partiklar. Metodiken för Prall är beskriven i EN 12697-16:2004. I Tröger skapas ett stötförlopp genom en vertikal stöt av en bunt med nålar mot vägbanan. Metodiken för Tröger provning är beskriven i EN 1871:2000 Annex K. De två ovan beskrivna metoderna har jämförts med VTIs vägprovningssmaskin av Snilsberg et al [10]. I VTIs vägprovningssmaskin kan både nötningen, såväl som de luftburna partiklarna som genereras från kontakten mellan däck och vägbana, studeras. Fyra hjul med justerbar hastighet är i VTIs utrustning i kontakt med vägbanan, som har en diameter på sex meter (Gustafsson et al [11]). Två andra testmetoder som använder hela däck, är en innerrörs-metod som är beskriven i [12] och en överrullningsmetod som används i Finland för godkännande av dubbdäck [13]. I överrullningsmetoden körs ett stensegment över 400 gånger i 100 km/h och stensegmentets massförlust används som kriterium för godkännande av dubbdäcken. På laboratorienivå har två utrustningar använts på KTH för att utvärdera dubbdäcksnotning. Dels en pinne-på-skivamaskin där pinnen motsvarar ett dubbdäck och skivan vägmaterialet, se [3]. Här simuleras den glidande delen i däck - vägbanakontakten där glidhastigheten och normallasten kan varieras. En izopod-pendel har också använts för att studera nötningen som dubbdäck orsakar på vägbans yta [13,14]. Här simuleras den stötande delen av dubbdäckskontakten såväl som den glidande rörelsen.

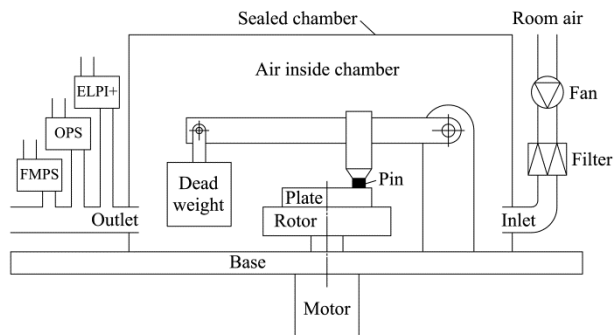
Avsikten med den här studien är att utvärdera fem olika vägbanematerial av betong och två stenmaterial med genom att simulera den glidande delen av dubbdäck-vägbanakontakten. Vidare är syftet att genomföra en tribologisk studie av nötning och luftburna nötningspartiklar från dubbdäck-vägbanakontakten.

Metod

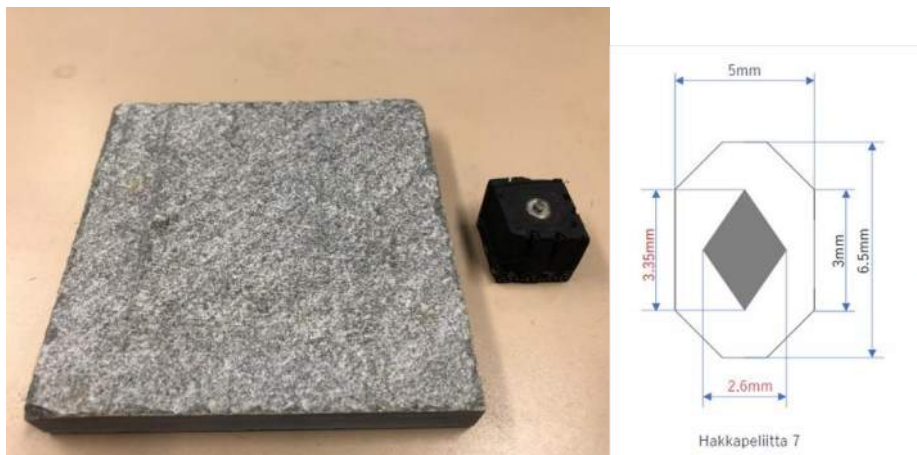
Provningen utfördes i en pinne-på-skiva maskin beskriven i Figur 1. Pinne-på-skiva maskinen har tidigare använts vid studier av nötning och luftburna partiklar orsakad av nötning, se [15, 16].

Pinnprovskroppen i pinne-på-skiva maskinen representerar ett bildäck med en 20 mm × 20 mm kvadratisk däckprov som innehåller en dubb. Figur 2 visar ett fotografi över en däckprovskropp och en vägprovskropp. Däckprovskropparna tillverkades genom vattenskarvning av bildäck. Vägprovskroppen var en rektangulär platta med storleken 80 mm × 80 mm × 15 mm. Den monterades på pinne-på-skivamaskinens rotor med ett skruvförband. En vikt användes för att trycka däckprovskroppen mot vägprovskroppen. Figur 3 visar ett fotografi över testuppställningen med en däckprovskropp och en vägprovskropp monterad. Skivan roteras med en varvtalsstyrd elektrisk motor. Friktionskraften mättes med en lastcell och nötningen mättes genom att väga provkropparna före och efter prov. Dubben orienterades så att den breda delen var vinkelrät mot glidriktningen, som i en normal däck-vägbanakontakt.

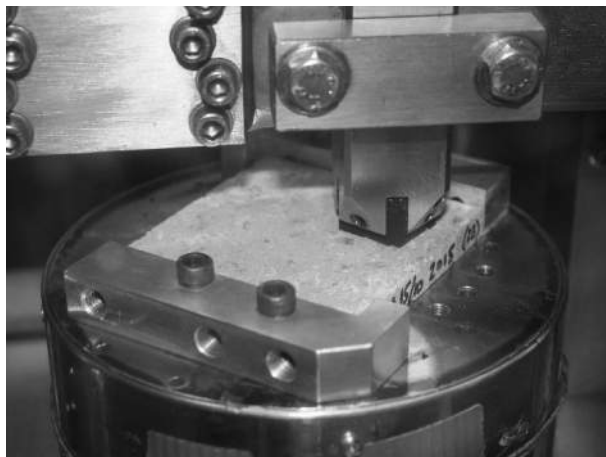
Luften som lämnade kammaren analyserades med ett mätinstrument för luftburna partiklar: OPS 3330, OPS klassificerar 0,3–10 µm partiklar i 16 storlekar. Observera att OPS mäter en optisk partikeldiameter. Innan provning så kontrollerades att varje instrument hade en nollnivå för partikelkoncentrationer. Notera att OPS 3330 har en 17e storlekskanal som registrerar partiklar större än 10 µm. Denna kanal användes inte i denna studie. Samplingsfrekvensen var 1 Hz.



Figur.1. Skiss över pinne-på-skiva testriggen.



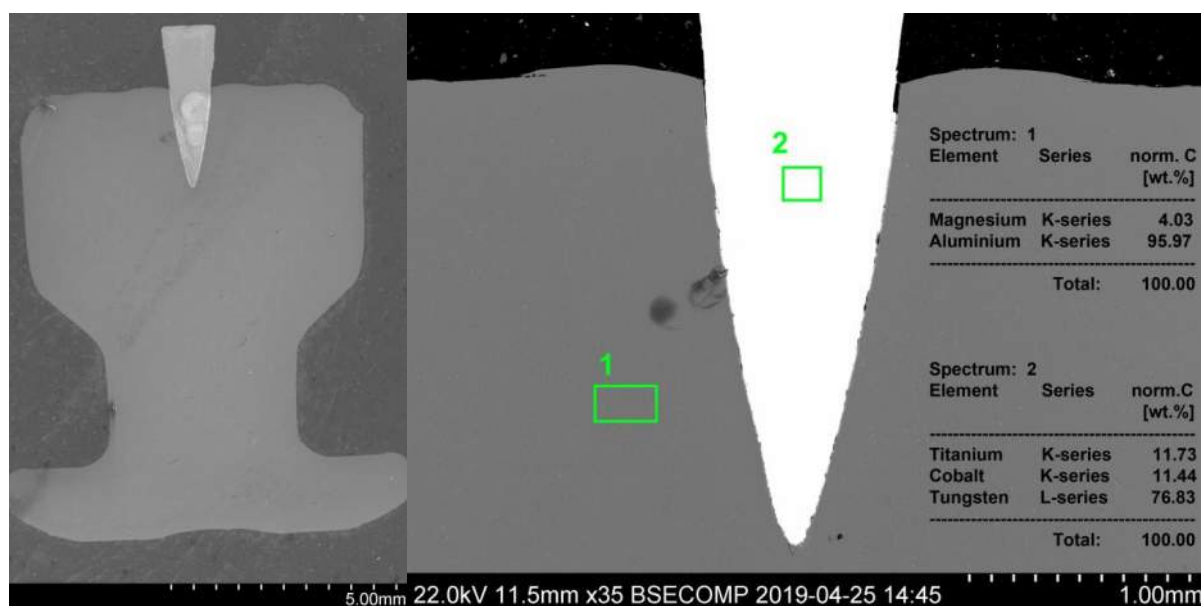
Figur 2. Till vänster vägmateriälsprovskropp och däckprovskropp. Till höger geometri för dubb, glidriktning är mot den breda diagonalen.



Figur.3. Provuppställning med betongvägsprovskropp som skiva, och däckprovskropp monterad som pinne.

Däckprovskropparna kommer från däck av modellen Nokian Hakkapeliitta 7, som var inkörda 500 km. Figur 4 visar ett tvärsnitt av en dubb med aluminiumkropp och stift av hårdmetall, samt en tillhörande EDX analys. Hårdmetallstiftet innehåller karbider av titan, kobolt och volfram. Aluminiumlegeringen innehåller förutom aluminium ca 4 % magnesium. Totalt fem vägmateriäl provades: Betong 1A, Betong 4A, Betong 5A, Betong 5C, Betong 7A. Dessutom provades två stenmaterial: granit och skiffer. Tabell 1 visar en översikt över de provade vägmateriälen. I appendix A presenteras en mer detaljerad sammanställning över de utvärderade vägmateriälen. Samtliga vägmateriäl tillverkades av Cementa i Slite efter recept av blandningsgruppen i projektet. Samtliga provkroppar (väg- och rena stenmaterial)

var tillverkade genom sågning. Slitageprovningsen utfördes efter två månaders härdning av vägmaterialet.



Figur 4. Tvärsnitt av dubb med aluminiumkropp och hårdmetallstift. Resultat från ämnesanalys med EDX presenteras också.

Tabell 1. Namn på väg- och stenmaterial, ingredienser och förkortningar på dessa.

Betongrecept/ingrediens	Namn
Sten: 11-16mm Durasplit	1A-Durasplit
Sten: 11-16mm Hovgården	4A-Hovgården
Sten: 11-16mm Torphyttan	5A-Torphyttan
Sten: 11-16mm Torphyttan	5C-Torphyttan
Sten: 11-16mm Hovgården	7A-Enhörna
Granit sågad "grey star"	Granit
Offerdalskiffer sågad	Skiffer

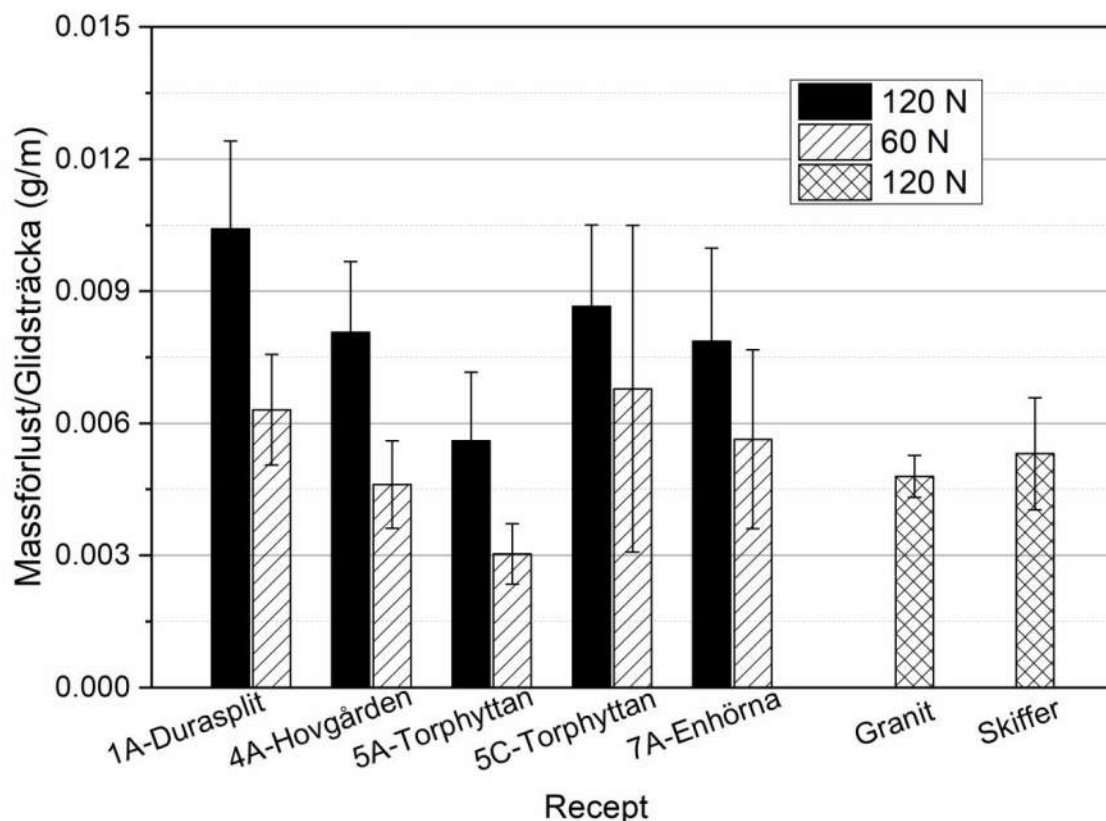
Fyra prov per vägmateriäl och lastnivå genomfördes. Två lastnivåer utvärderades: 120 och 60 N. Notera att för de rena stenmaterialen genomfördes bara prov på lastnivå 120 N. Detta berodde på ett begränsat antal tillgängliga provkroppar. Den totala glidsträckan var 5 m och glidhastigheten 0,1 m/s.

För att mäta massan bortnött materiäl vägdes provkropparna med en våg (Mettler Toledo XP20035, noggrannhet 1mg) före och efter prov. Innan vägning och innan prov i testutrustning, var provkropparna placerade i en klimatkammare med 50 % relativ luftfuktighet och en temperatur om 22 °C i 24 h.

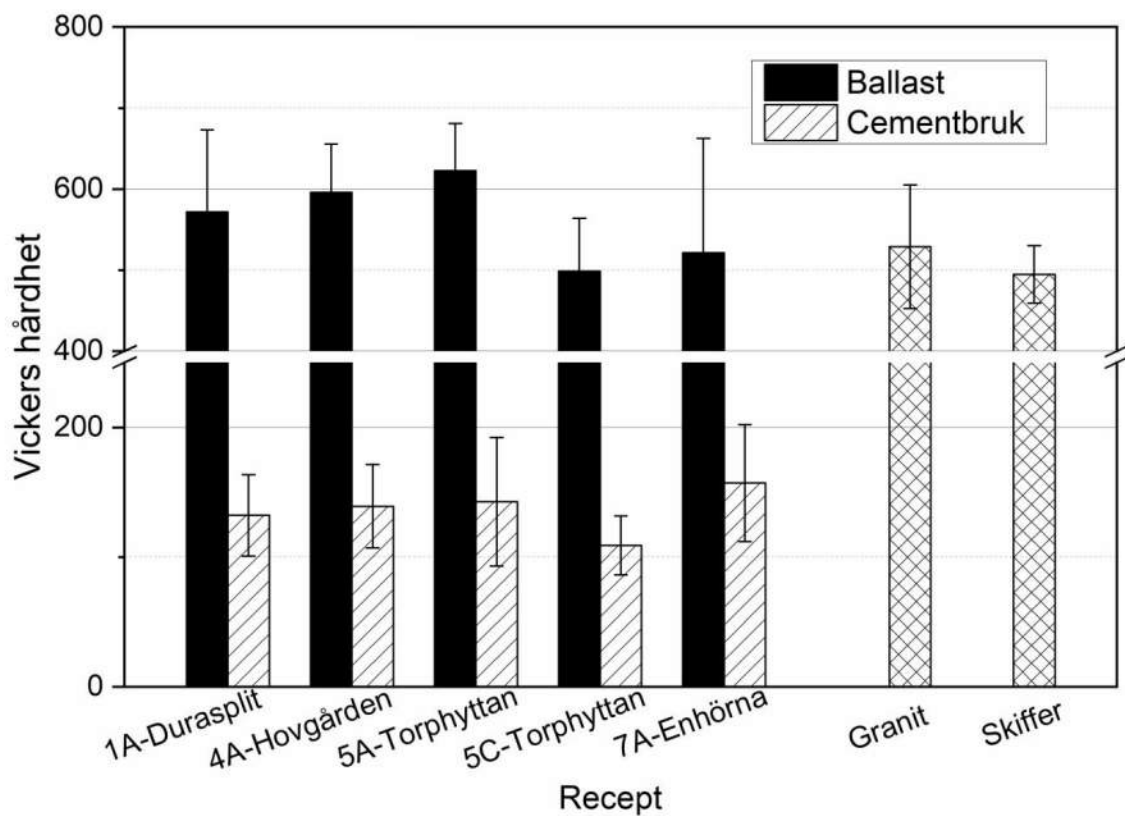
Efter proven analyserades nötningsspåren med en ett släpnålsinstrument Talysurf intra som har en upplösning om 16nm vid ett mätområde på 1mm. Totalt fem mätningar genomfördes på varje väg- och stenmateriäl. En hårdhetsmätare, Krautkrämer Dynamics, som mäter enligt LEEB hårdhetsvärde (HL), vilket är ett förhållande av rekylhastigheten och anslagshastigheten användes på betongprovkropparna och stenprovkropparna. HL-värdet konverteras sedan till hårdhetsvärden enligt Vickers. Tio hårdhetsmätningar genomfördes på ballastdelen, och tio genomfördes på cementpastadeln. För de rena stenmaterialen genomfördes tio hårdhetsmätningar på respektive materiäl. Hårdhetsmätaren kalibrerades med en hårdhetsnormal före och efter mätning, och avvikelsen från hårdhetsnormalen av stål var som mest i medelvärde av 10 mätningar 3 HV.

Resultat

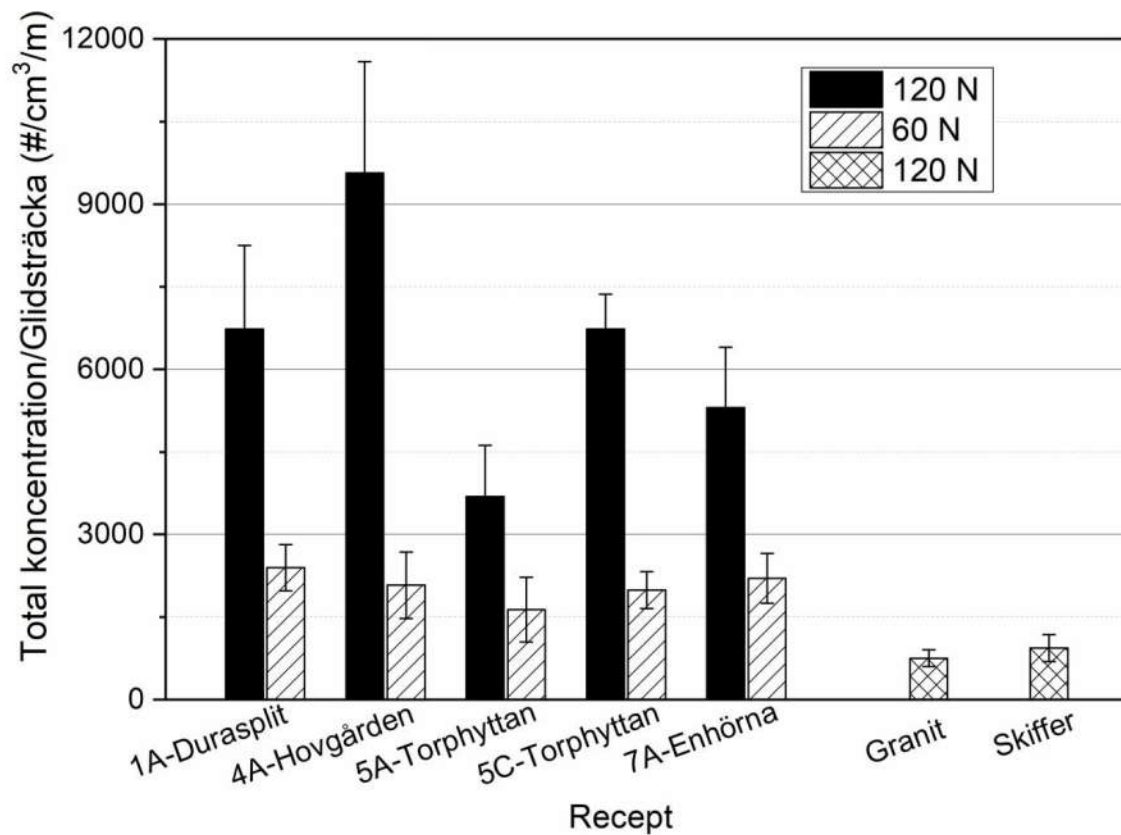
Figur 5 visar på nötningen för respektive vägmateriäl i form av massförlust dividerat med sträckan som dubben har glidit mot materialet. Figur 6 visar på hårdheten för respektive vägmateriäl i enheten Vickers. I figur 7 redovisas total koncentration av luftburna partiklar mindre än 10 μm per meter glidsträcka. Noterbart här är de väsentligt lägre halterna för de två rena stenmaterialen. Om vi studerar resultaten i Figurerna 5 och 7 ser vi att koncentrationen luftburna partiklar per meter glidsträcka rankar på samma sätt som massförlust per meter glidsträcka för de rena vägbeläggingsmaterialen. Detsamma gäller för de två rena stenmaterialen. Figurerna 5 och 7 visar också på ett tydligt lastberoende både för nötningen och för koncentrationen luftburna partiklar om man jämför resultaten för prov vid 120 N respektive 60 N i normalkraft. Jämför man Figurerna 5 och 7 med Figur 6 ser man att både nötningen och koncentrationen av luftburna partiklar minskar med en ökad hårdhet hos ballasten respektive stenmaterialet. Figurer 8 redovisar storleksfördelningar över medelvärdet under provtiden för antalet uppmätta partiklar. Resultaten för antalsfördelningen visar på en storleksfördelning som har toppar kring 2 μm 1 μm samt en mindre storlek under instrumentets detekteringsgräns för alla provade vägmateriälkombinationer. De två rena stenmaterialen visar på samma beteende men på en mycket lägre koncentrationsnivå. Figur 9 visar foton över de provade vägmaterialet efter prov. På samtliga ytor syns spår efter dubbstiftets kontakt med vägmaterialets yta. I figur 10 redovisas exempel på nötningsprofilens djup efter prov med 120 N i last. Tabell 2 redovisar maximalt nötningsdjup efter prov också för 120 N i last.



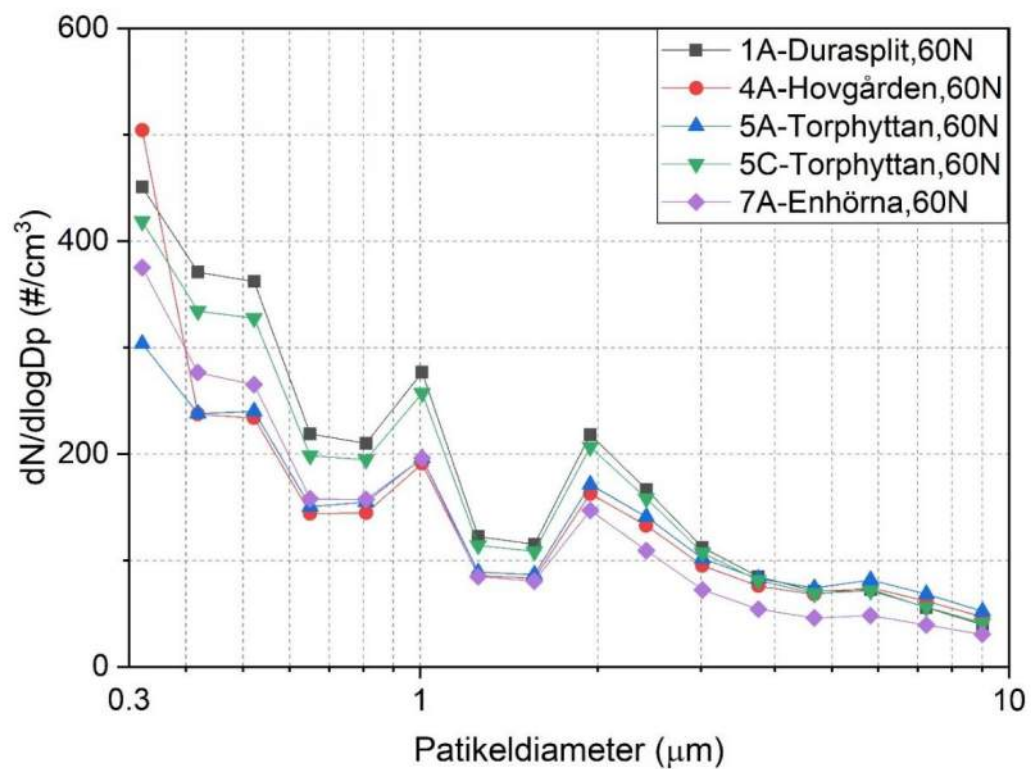
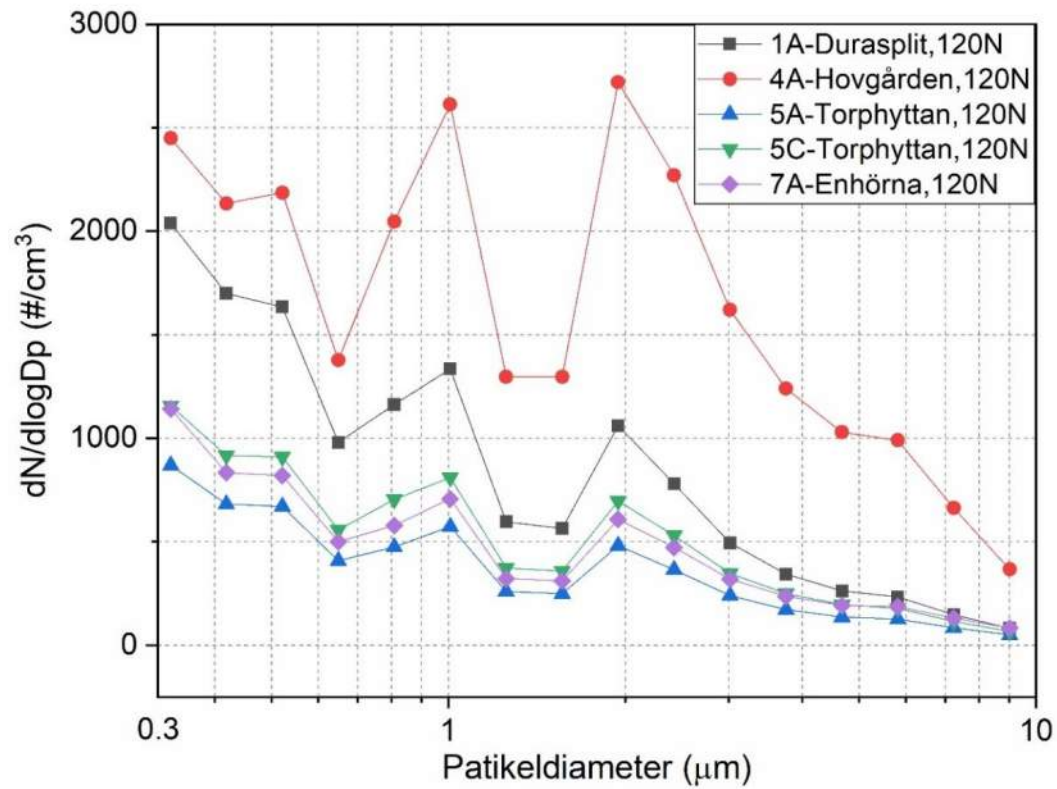
Figur. 5 Massförlust per meter glidsträcka, provresultat angivet som medelvärde och standardavvikelse.

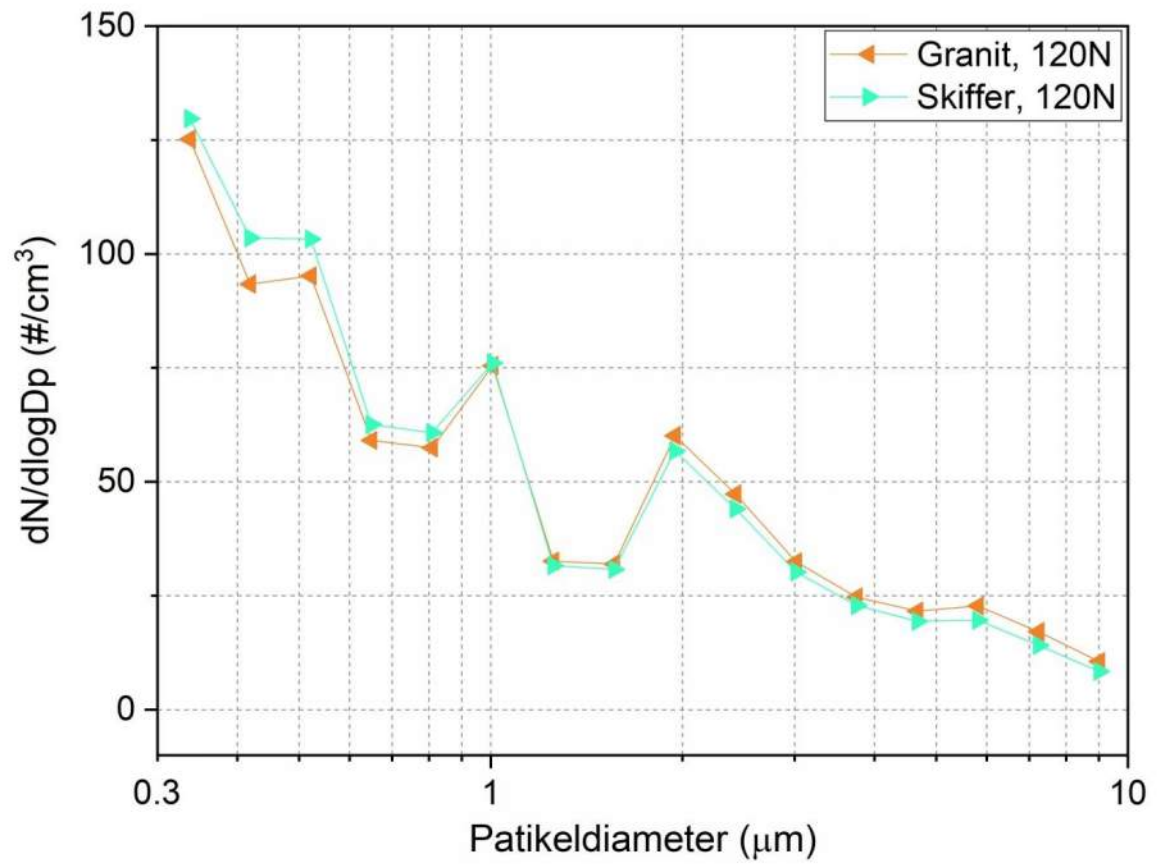


Figur. 6 Hårdhet, provresultat angivet som medelvärde och standardavvikelse.



Figur 7. Total koncentration uppmätta partiklar per meter glidsträcka för mätinstrument OPS. Enskilda provresultat samt medelvärde och standardavvikelse.





Figur 8. Medelvärde av storleksfördelning baserat på antal partiklar uppmätta med OPS.



1A-Durasplit



4A-Hovgården



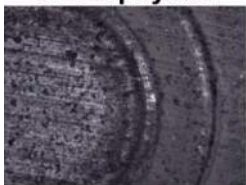
5A-Torphyttan



5C-Torphyttan



7A-Enhörna

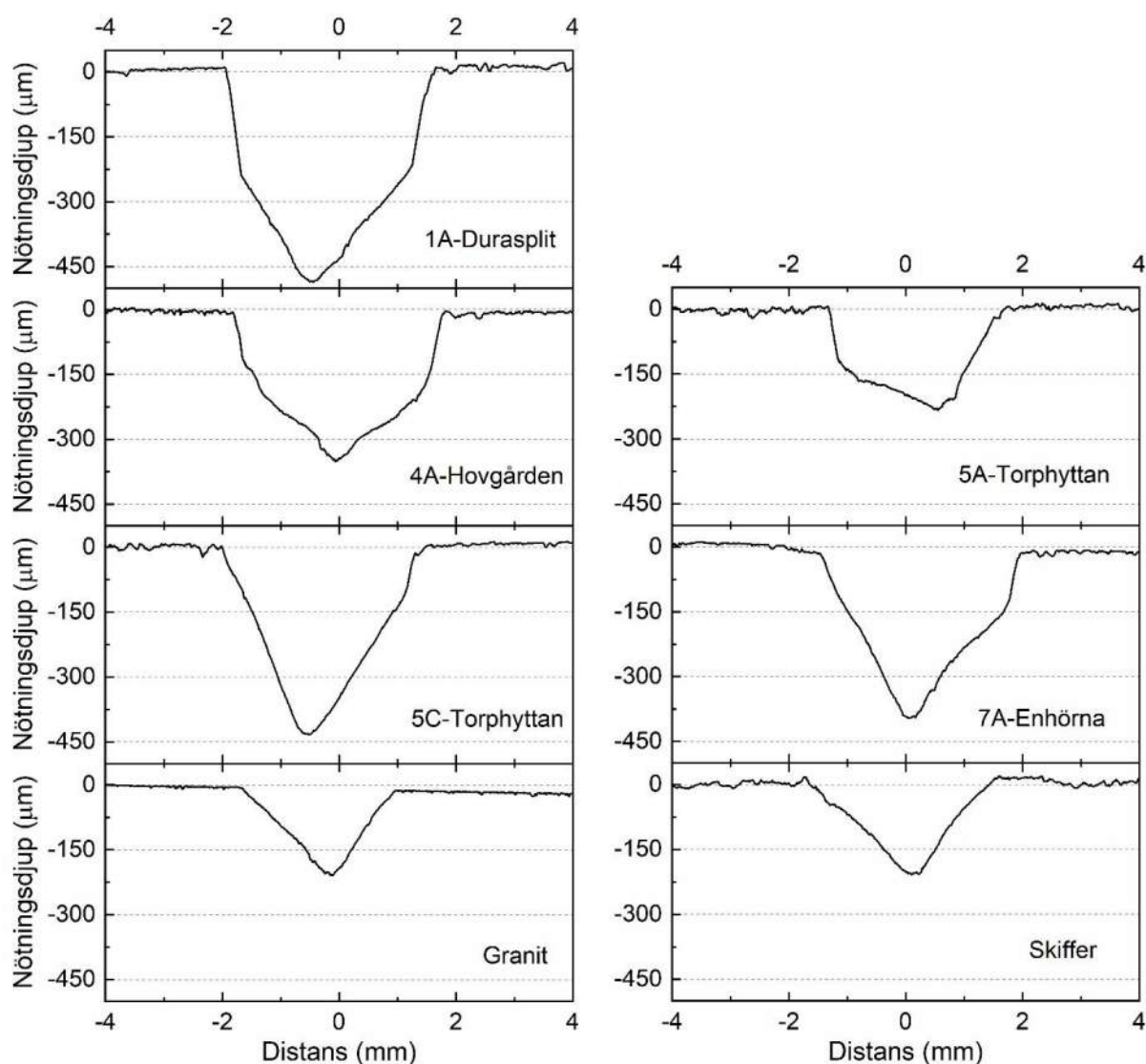


Granit



Skiffer

Figur 9. Foto över del av respektive vägmaterialets kontaktyta efter prov. I samtliga fall syns spår av dubbstiftets kontakt med ytan.



Figur 10. Typiska exempel på nötningsdjup efter prov för respektive väg- och stenmaterial.

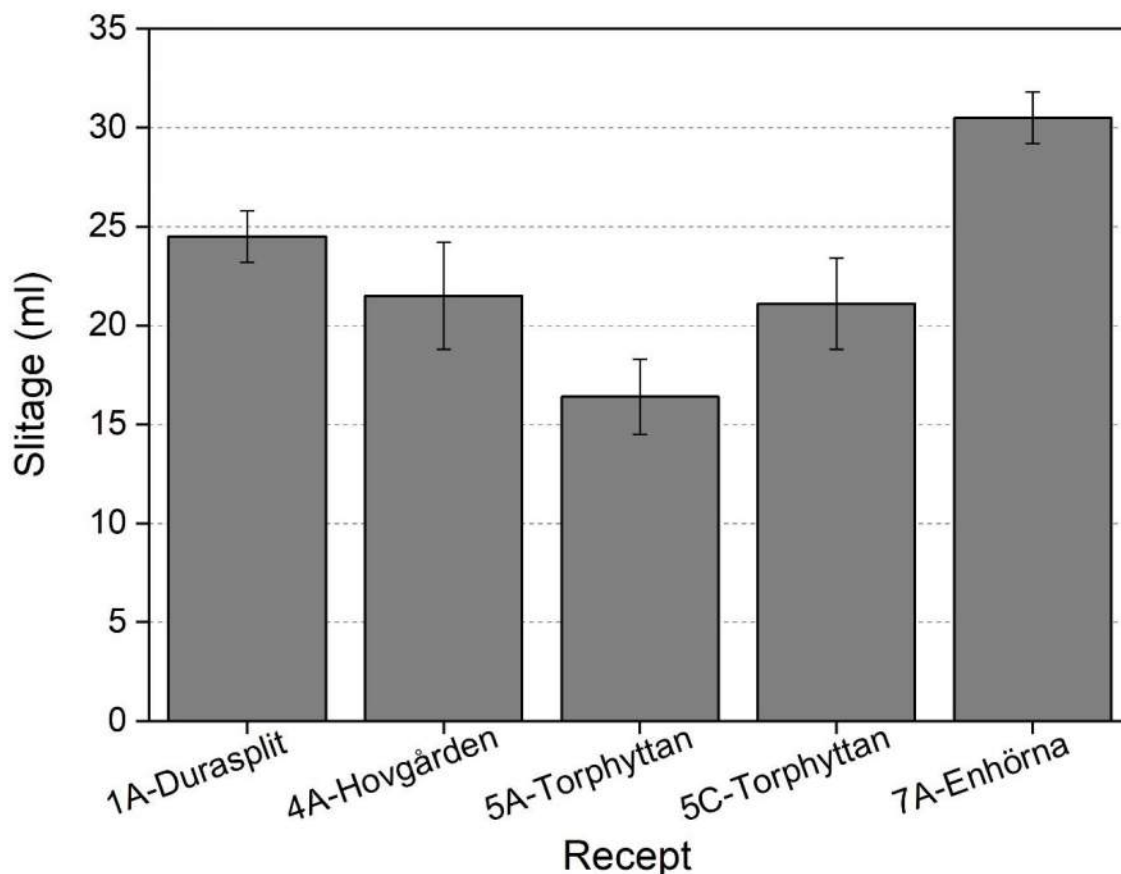
Tabell 2. Maximalt uppmätt nötningsdjup efter prov. Provresultatet presenteras för respektive väg- och stenmaterial som medelvärde och standardavvikelse.

Recept	1A-Durasplit	4A-Hovgården	5A-Torphyttan	5C-Torphyttan	7A-Enhörna	Granit	Skiffer
Nötningsdjup (µm)	-436±73	-327±56	-212±66	-403±68	-382±92	-193±16	-206±21

Diskussion

Jämför man Figurerna 5 och 6 ser man att nötningen för vägprovskropparna tillverkade av betong visade lägst värde för betong 5A samtidigt som stenen i betong 5A visar högst värde på hårdhetsproven. Detta resultat att hårdare sten leder till minskad nötning är i överensstämmelse med tidigare resultat presenterade i [3]. Resultat av nötningens beroende av ballastens hårdhet är också i överensstämmelse med fullskaleförsök presenterade i [4], där fyra olika vägmateriäler utvärderades, och ett klart samband mellan vägmateriälets sammansättning och dubbdäcksnotning kunde identifieras. En sammanfattning av fullskaleförsöken redovisade i [5] stödjer också resultaten. Prallprovning utförd på samtliga betongvägmateriäl provades av VTI enligt SS-EN 12697-16. Resultaten presenteras i Appendix B och

sammanfattas i Figur 11. Prallprovningen visar också att betong 5A är mest nöttningsbeständig. Prallprovningen rangordnar storleken på nötningen på samma sätt som för de här redovisade pinne-på-skivaproven utom för betong 7A, som redovisar betydligt högre nivåer på nötningen i Prallprovningen. Foton över vägbetong och de rena stenproverna efter prov presenterade i Figur 9 visar på nötning av samtliga provkroppar som också är redovisade som exempel i Figur 10. Man ser en spetsig form på nöttningsdjupet som troligen orsakas av att dubben kan röra sig inne i däcksmaterialet och ställer sig i en lutande position när dubben glider mot vägmaterialet. Det uppmätta spår djupet (Tabell 2) rangordnar nötningen av väg- och stenmaterialen på samma sätt som den uppmätta massförlusten i Figur 5 och betong 5A är den mest nöttningsbeständiga. Spår djupet i Tabell 2 visar på att även de rena stenmaterialen nöts ner av dubbstiften. Att även rena stenmaterial nöts ner av dubben kan förklaras av den stora hårdhetsskillnaden mellan dubbstiftet och stenen i vägmaterialet, se [3].



Figur 11. Slitage för vägmaterialet uppmätt enligt Prallmetoden, provresultat angivet som medelvärde och standardavvikelse.

Figur 7 visar att betong 5 A även visar de lägsta koncentration av luftburna partiklar. Detta resultat är också i överensstämmelse tidigare resultat [3] desto hårdare sten desto lägre koncentration av luftburna partiklar. På samma sätt rangordnar de rena stenproverna resultaten. Den hårdare graniten nöter mindre och genererar lägre partikelkoncentrationer jämfört med den mjukare skiffern. En lägre last på dubben ger lägre nötning och lägre partikelkoncentrationer för betongprovkropparna, se Figurerna 5 och 7. Detta är i överensstämmelse med tidigare resultat presenterade i [3].

Antalsfördelningen visar på en storleksfördelning som har toppar kring 2 μm 1 μm samt en mindre storlek under instrumentets detekteringsgräns för alla provade vägmaterialkombinationer. Antalsfördelningarna för de luftburna partiklarna som presenteras i Figur 8 visar att det är samma storleksfördelningar som tidigare uppmäts för betongprovkroppar i kontakt med dubbdäcksmaterial, se [3]. Topparna på fördelningarna ligger i samtliga fall på 1 och 2 μm . Antalsfördelningarnas utseende är

i överstämmelse med tidigare studier för luftburna partiklar genererade från mekanisk nötning, se [15] och [16].

Slutsatser

Nötning och dess alstring av luftburna partiklar, när ett dubbdäck är i kontakt med vägmateriäl har studerats. En pinne-på-skivamaskin placerad i en kammare med ren luft användes. Följande slutsatser kan dras från den genomförda studien:

- Nötningen och partikelkoncentration för vägmateriäl av betong uppvisar en invers proportionalitet mot ballastens hårdhet. Ju mjukare materiäl desto mer nöts vägmaterialet av betong och desto mer ökar halten av de luftburna partiklarna. Två rena stenmateriäl visar samma rankning av hårdhetens inverkan. Även de rena stenmateriälerna uppvisar en mätbar nötning orsakad av dubbstiften.
- En sänkning av normallasten reducerar nötningen och partikelkoncentrationen för vägmateriäl av betong.
- En antalsfördelning med två toppar (1 och 2 μm) kunde registreras för vägmateriäl av betong. För de rena stenmateriälerna kunde motsvarande toppar om (1 och 2 μm) registreras.

Tack

Denna rapport är en delrapport inom det av Trafikverket finansierade BVFF projektet ”Hållbara betongvägar”. Författarna tackar blandningsgruppen: Niklas Johansson Cementa, Sten Hjelm, Cementa och Iad Saleh, NCC Teknik för tillverkningen av provkropparna, och de övriga projektdeltagarna: Lars Kraft Rise CBI, Åsa Laurell Lyne RISE CBI, Thomas Johansson Skanska Roger Nilsson Skanska, Mats Gustafsson VTI, Ellen Dolk VTI, Niklas Johansson Heidelbergcement, Björn Kullander Trafikverket, Johan Silwerbrand KTH, och Erik Simonsen Cementa för värdefulla synpunkter under projektet.

Referenser

- [1] Furberg, A.; Arvidsson, R.; Molander, S. Dissipation of tungsten and environmental release of nanoparticles from tire studs: A Swedish case study. J. Clean. Prod. 2018. under review.
- [2] Peltola, P.; Wikström, E. Tyre stud derived tungsten carbide particles in urban street dust. Boreal Environ. Res. 2006, 11, 161–168.
- [3] Olofsson U., Tu M., Nosko O., Lyu Y., Nötning och luftburna partiklar från kontakten mellan dubbdäck och betongvägar – en laboriöriestudie i en pinne-på-skiva maskin, TRITA-MMK 2018:01, Institutionen för Maskinkonstruktion KTH 2018.
- [4] Preus C.K. Effect of studded tires on pavement wear and traffic safety, Minnesota Highway Department USA (1973).
- [5] Significance of tests and properties of concrete & concrete making materials, ASTM 169D, Eds Lamond J., and Pielert J (2006)
- [6] Cotter A., Muench S.T., Studded Tire Wear on Portland Cement Concrete Pavement in the Washington State, Department of Transportation Route Network, WSDOT Research Report (2010), WA-RD 744.3.
- [7] Gültlinger J., Gauterin F., Brandau C., Schlittenhard J., Wies B., Investigations of Road Wear Caused by Studded Tires, Tire Science and Technology Volume 42, Issue 1, January 2014, Pages 2-15.
- [8] Pacejka HB Tyre and vehicle dynamics. Butterworth–Heinemann, Oxford (2002)
- [9] Torbjörn Jacobson Trafikverket, Workshop Slitstarkare beläggningar för framtiden, 2013.
- [10] Snilsberg B., Myran T., Uthus N., Aurstad J., Evaluation of different laboratory methods for simulation of pavement wear and road dust generation from studded tires,. Road Materials and Pavement

Design Volume 9, (2008) 287-304 Issue sup1: SPECIAL ISSUE ON ASPHALT TECHNOLOGY (EATA 2008). doi.org/10.1080/14680629.2008.9690170

[11] Gustafsson M., Blomqvist G., Gudmundsson A., Dahl A., Jonsson, P., Swietlicki E., Factors influencing PM10 emissions from road pavement wear, Atmospheric Environment Volume 43, Issue 31, October 2009, Pages 4699-4702.

[12] Determination of road wear caused by studded winter tyres, Test world 23-6-2010, www.testworld.fi

[13] Sánchez G., TEST DEVELOPMENT AND SIMULATION OF THE BRITISH PENDULUM TESTER FOR STUDED TIRES WEAR, Master of Science Thesis MMK 2017:72 MKN 182, Maskinkonstruktion KTH 2017.

[14] Kozuka R., Studded tire wear - comparison between British Pendulum and Pin on disc testing, Master of Science Thesis MMK 2017: MKN 188, Maskinkonstruktion KTH 2017.

[15] Olofsson U., Olander L., and Jansson, A., A Study of Airborne Wear Particles Generated from a Sliding Contact, J. Tribol. 131, 044503, 2009, doi:10.1115/1.3176990

[16] Olofsson U., A Study of Airborne Wear Particles Generated from the Train traffic—Block Braking Simulation in a Pin-on-Disc Machine, Wear 271(1-2) 2011

Resultat Prall enligt SS-EN 12697-16								
VTInr	18-084			Skrym				
						Pralltest		
Serie	Provnr	provomg.	testdatum	pbssd (g/ml)	Vikt efter vattenlagring, M1 (g)	Vikt efter Prall; M2 (g)	Slitage; AbrA (ml)	
1A	1A-1	omg1. best 181106	2018-11-23	2,448	621,0	562,4	23,9	
1A	1A-2	omg1. best 181106	2018-11-23	2,438	611,5	547,1	26,4	
1A	1A-3	omg1. best 181106	2018-11-23	2,454	625,3	567,8	23,4	
1A	1A-4	omg1. best 181106	2018-11-23	2,467	591,3	531,7	24,2	
						Medel	24,5	
						Standardavvikelse	1,3	
						Variationskoefficient	5,4	
4A	4A-1	omg1. best 181106	2018-11-27	2,406	570,2	511,8	24,3	
4A	4A-2	omg1. best 181106	2018-11-27	2,424	596,4	550,5	18,9	
4A	4A-3	omg1. best 181106	2018-11-27	2,413	613,1	556,8	23,3	
4A	4A-4	omg1. best 181106	2018-11-27	2,419	611,7	564,5	19,5	
						Medel	21,5	
						Standardavvikelse	2,7	
						Variationskoefficient	12,5	
5A	5A-1	omg1. best 181106	2018-11-23	2,422	608,9	568,6	16,6	
5A	5A-2	omg1. best 181106	2018-11-23	2,434	609,3	571,7	15,4	
5A	5A-3	omg1. best 181106	2018-11-23	2,445	615,4	579,8	14,6	
5A	5A-4	omg1. best 181106	2018-11-23	2,430	626,6	580,6	18,9	
						Medel	16,4	
						Standardavvikelse	1,9	
						Variationskoefficient	11,6	
5C	5C-1	omg1. best 181106	2018-11-23	2,363	491,0	434,5	23,9	
5C	5C-2	omg1. best 181106	2018-11-23	2,394	555,8	509,1	19,5	
5C	5C-3	omg1. best 181106	2018-11-23	2,393	558,7	506,2	21,9	
5C	5C-4	omg1. best 181106	2018-11-23	2,407	571,7	526,3	18,9	
						Medel	21,1	
						Standardavvikelse	2,3	
						Variationskoefficient	11,0	
7A	7A-1	omg1. best 181106	2018-11-23	2,459	614,7	543,4	29,0	
7A	7A-2	omg1. best 181106	2018-11-23	2,466	678,0	604,4	29,9	
7A	7A-3	omg1. best 181106	2018-11-23	2,495	615,4	535,9	31,9	
7A	7A-4	omg1. best 181106	2018-11-23	2,488	674,3	596,1	31,4	
						Medel	30,5	
						Standardavvikelse	1,3	
						Variationskoefficient	4,4	



**Laboratoriestudie av nötning i kontakten mellan dubbdäck och betongvägar –
jämförelse mellan två betongrecept med tre olika stensorter i fyra olika laboratorieprovmetoder**

Ulf Olofsson¹, Yezhe Lyu¹, Lars Kraft²

¹Institutionen för Maskinkonstruktion KTH, 100 44 Stockholm Sverige

²RISE CBI Betonginstitutet, 114 86 Stockholm Sverige

Sammanfattning

En experimentell studie har utförts för att mäta nötning i kontakten mellan dubbdäck och betongvägmaterial. Totalt sex olika betongvägmaterial, två betongrecept och tre stenmaterial, utvärderades med fyra olika laboratorieprovningssmetoder: pinne-på-skivaprov, pendelprov, Prallprov och Böhmeprov. Vid pinne-på-skivaprov och i pendelprov användes ett dubbdäck (Nokian Hakkapeliitta 7) som motyta. Vid Prallprov och Böhmeprov användes stålkulor respektive en stålskiva som motyta. Den bortnötta massan uppmättes i de fyra olika provmetoderna, dessutom uppmättes betongvägmaterialens hårdhet. Resultaten visar att betongvägmaterialen med hårdast ballast visade en signifikant lägre nötning i dom båda provmetoderna (pinne-på-skiva och pendel) som använde dubbdäck som motyta. Fler variabler såsom total ballastvolym, D_{max} och v_{ct} , påverkar också betongvägmaterialens nötning. För de övriga två provmetoderna var rankningen av betongvägmaterialens nötning motsatt mot de som erhöles med pinne-på-skiva och pendel.

Nyckelord: nötning, dubbdäck, vägbetong

Abstract

An experimental study of the wear from the studded tire to concrete road contact has been performed. Totally six different concrete road materials were evaluated in four different test methods: pin-on-disc test, friction pendulum test, Prall test and Böhme test. For the pin on disc test and pendulum test a studded tyre was used as counter surface (Nokian Hakkapeliitta 7). For the Prall and the Böhme tests was steel balls respectively a steel disc utilized as counter surface. The wear was for each method measured and also the hardness of concrete road materials. The results show that the concrete road material with the highest stone hardness had a significant lower wear value in both test methods (pin on disc and friction pendulum) that used a studded tyre as counter surface. More variables as ballast volume, v_{ct} and D_{max} , also influence the wear. For the other two test methods the ranking of the concrete road materials wear resistance was opposite to the one from the results achieved with the pin-on-disc and pendulum tests.

Keywords: wear, studded tires, concrete road

Introduktion

Användning av dubbdäck under vintermånaderna orsakar nötning av vägbanan. 1999 var det årliga nötningen av vägarna i Sverige, ca 110 000 ton [1]. Det var en minskning från tidigare notering om 450 000 ton 1989. Minskningen antas bero på bättre vägkvalitet och en införd kvavställning via lagstiftning på dubbdäck. Sedan bottennoteringen 1999 har den årliga nötningen ökat igen till ca 150 000 ton och ökningen antas bero på en ökad trafikintensitet. Kostnaden för dubbdäcksnötningen på det statliga vägnätet beräknades 2006 [1] ligga mellan 300 och 400 Mkr per år. Utöver det uppskattades 2006 nötning av vägmarkeringar till ca 50 Mkr per år. Förutom den stora kostnaden orsakar dubbarna nötning också en kraftig ökning av inandningsbara luftburna partiklar, vilket orsakar miljöproblem i städerna, såsom sämre luft. På grund av detta begränsar lagstiftningen dubbanvändningen. Från augusti 2013 är normallasten på en dubb begränsad till 120 N, dubbvikten till 1,1 g och utsticket till 1,2 mm. Antalet dubbar är också begränsat till 50 st. i kontakt per rullad meter.

Vid höga hastigheter domineras nötningen av dynamiska förlopp när dubben kommer in i kontakten. Här är skademekanismerna slag och krossning. Vid låga hastigheter så domineras nötningen av en glidande nötning s.k. repning. I [2] används en fordons hastighet om 50 km/h som skiljehastighet mellan dynamiska förlopp och repande förlopp.

I Sverige används normalt bitumen som vägmaterial, men i länder där dubbdäck är förbjudna används också betong som vägmaterial. I vägbetong är ca 70 volymprocent stenmaterial (ballast) och resterande ca 30 % är en pasta med olika innehåll. Bitumenvägar (asfaltsvägar) består av ca 83 volymprocent stenmaterial, ca 12 % bitumen och ca 5 % filler.

Det finns flera utrustningar som mäter nötningsmotståndet för vägmateriäl. En utrustning som bygger på ansatsen att det är ett stötförlopp som står för nötningen är Prall. I Prall vibreras kullagerkuler på vägytan, samtidigt som kallt vatten sköljer bort lösa partiklar. Metodiken för Prall är beskriven i [3] och är ursprungligen utvecklad för provning på bituminösa vägmateriäl. På laboratorienivå används två utrustningar där däckprovkroppar med dubb nöter provkroppar av vägmateriäl. Dels har en pinne-på-skivamaskin använts, där pinnen utgör en dubb från ett dubbdäck och skivan är en utsågad platta av vägbeläggning, se [4]. Här simuleras den glidande nötningsdelen i däck-vägbanakontakten, och glidhastigheten och normallasten kan varieras. Dels har en friktionspendel använts [5, 6]. Här simuleras både den stötande dynamiska och den glidande nötningen av dubbdäckskontakten mot vägmateriälet. Man kan även prova ballastens abrasionsmotstånd. Det kan t.ex. göras med kulkvarnsmetoden (Nordic ball mill test) [7]. För betonggolv finns flera metoder att utvärdera nötningsmotståndet. I en metod nöts en utsågad platta av betong med eller utan abrasivt medium mot en roterande stålskiva, ett så kallat Böhmeprov [8].

Syftet med föreliggande arbete är främst att jämföra nötningen på olika vägbetongsmateriäl. I Sverige saknas för närvarande standardiserade metoder för sådana provningar, då de tillgängliga metoder som är presenterade ovan, är utvecklade för provning av bitumenvägmateriäl. När det gäller provning av endast ballasten föreligger givetvis inga skillnader, dock med vetskapen om att det totala ballastinnehållet i vägbetong är ca 70 volymprocent [9] att jämföra med 80 volymprocent i asfalt [10]. Studien utvärderar nötningen av olika vägbetongbeläggningar mot dubbdäckskontakten genom att använda fyra olika provmetoder: Pinne-på-skiva, Friktionspendel, Prall och Böhme.

Material

Totalt provades sex olika betongrecept: Betong 2H, Betong 2D, Betong 2R, Betong 5.1H, Betong 5.1D och Betong 5.1R. Två olika recept har provats med tre olika ballastsorter. Det ena receptet har en något annorlunda kornkurva, med en jämnare kornstorleksfördelning för de mindre kornstorlekarna. Tabell 1 visar en översikt över de provade vägmateriälerna. Vattencementtalet (vct) är förhållandet mellan vatten och cement. Dmax är den största använda stenstorleken i betongen. Samtliga vägmateriäl tillverkades av RISE CBI. I Appendix 1 Tabell 1.1, redovisas data för kulkvarnsvärde [9] på de tre olika ballastsorterna. De angivna kulkvarnsvärdena är värden från ballastleverantörerna.

I Appendix 1 Figur 1.1 och Figur 1.2 visas uppmätt hållfasthet på de olika betongrecepten som en funktion av härdningstiden där proverna har förvarats i vatten. Provning har skett enligt standarder [11, 12]. Hållfasthetsvärdena sprider inte så mycket, förutom att Betong 2R uppvisar lägre hållfasthet än övriga recept pga. högre lufthalt. Högst tryckhållfasthet efter 90 dagar hade Betong 2H och Betong 2D, med värden på 83 MPa respektive 84 MPa. Högst spräckhållfasthet hade Betong 5.1H och Betong 5.1D på 6,6 MPa. Recept 2, med mindre storlek på Dmax, och lägre cementhalt, pastamängd och vct, gav något högre tryckhållfasthet men lägre spräckhållfasthet jämfört med recept 5.1. Ingen klar tendens fanns på skillnader i hållfasthet för de olika ballastsorterna.

Tabell 1. Namn på vägmateriäl, ingredienser och förkortningar på dessa.

Betongrecept/ingrediens	Namn
Dmax 11 mm, Hovgården, 60 % grovballast, vct=0,36	Betong 2H
Dmax 11 mm, Durasplit 60 % grovballast, vct=0,34	Betong 2D
Dmax 11 mm, Ryolit 60 % grovballast (med Hovgården 2-5 mm), vct=0,36	Betong 2R
Dmax 16 mm, Hovgården 60 % grovballast, jämnare kornkurva, vct=0,37	Betong 5.1H
Dmax 16 mm, Durasplit 60 % grovballast, jämnare kornkurva, vct=0,37	Betong 5.1D
Dmax 16 mm, Ryolit 60 % grovballast (med Hovgården 2-5 mm), vct=0,35	Betong 5.1R

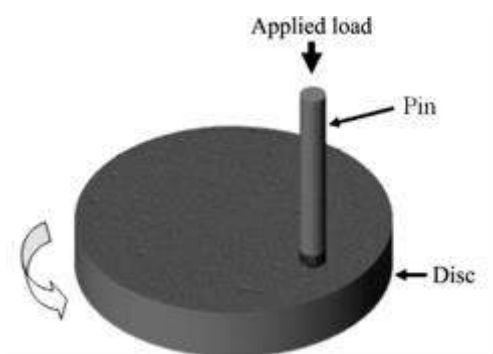
Experimentella metoder

Nötnings- och hårdhetsprovningen på de olika materialen skedde efter tre månaders härdning av respektive vägmateriäl. Provningen utfördes i en pinne-på-skivamaskin, som är beskriven i Figur 3, och i en pendelprovningssmaskin, som är beskriven i Figur 4. Dessutom utfördes provning med hjälp av Prallmaskin enligt [3] och Böhmemaskin enligt [8].

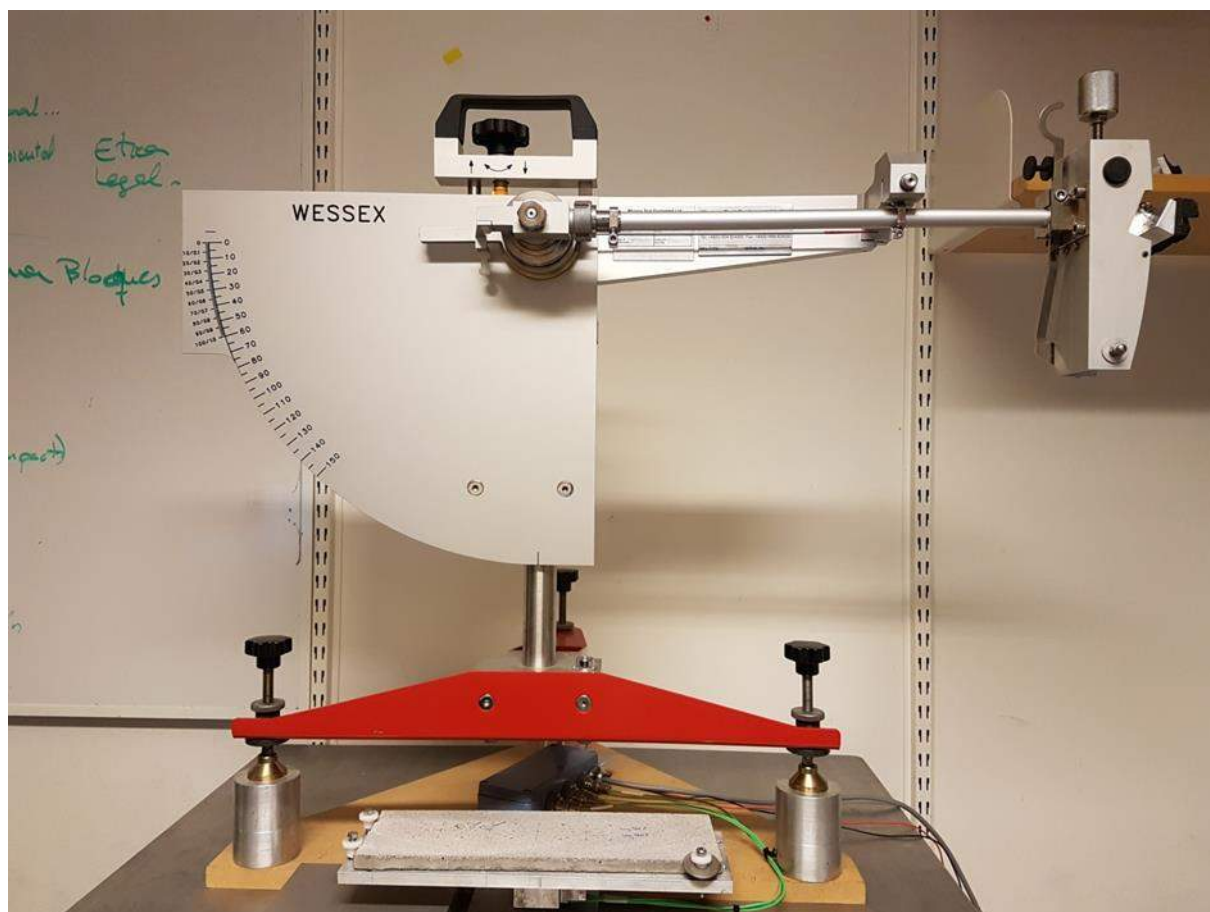
Pinnprovskroppen i pinne-på-skivamaskinen representerar bildäcket och består av en $20 \times 20 \text{ mm}^2$ kvadratisk däckprov med en dubb. Figur 5 visar ett fotografi över en däckprovskropp. Däckprovskropparna tillverkades genom vattenskrining av bildäck. Vägprovskroppen av betong var en rektangulär platta som sågats till storleken $80 \times 80 \times 15 \text{ mm}^3$. Den monterades på pinne-på-skivamaskinens rotor med ett skruvförband. En vikt användes för att trycka däckprovskroppen mot vägprovskroppen. Friktionsradien var mellan 35 och 45 mm, alltså avståndet mellan rotoraxeln och däckprovskroppens mittpunkt. Figur 6 visar ett fotografi över pinne-på-skivamaskinen med en däckprovskropp och en vägprovskropp påmonterad. Skivan roteras med en varvtalsstyrd elektrisk motor. Friktionskraften mättes med en lastcell och nötningen mättes genom att väga provkropparna före och efter prov. Vid prov med dubbar, så orienterades dubben så att den breda delen var vinkelrät mot glidriktningen, som i en normal däck-vägbanakontakt.

Provkropparna av betong i pendelproven hade sågats till rektangulära plattor $180 \times 80 \times 15 \text{ mm}^3$ mot en rektangulär dubbdäcksprovskropp $80 \times 25 \text{ mm}^2$ med två dubbar. Dubbdäcksprovskroppen var utskuren med hjälp av vattenjet och dubben var orienterad så att den breda delen var vinkelrät mot glidriktningen. Pendelprovaren kommer från Wessex Test Equipment och används normalt för att studera halka på vägbanoor. Pendelproven illustreras schematiskt i Figur 7. Steg 1: pendelarmen frigörs. Steg 2: dubbdäcksprovet går i kontakt med vägprovet. Steg 3: dubbdäcksprovet lämnar vägprovet efter en glidsträcka om 120 mm.

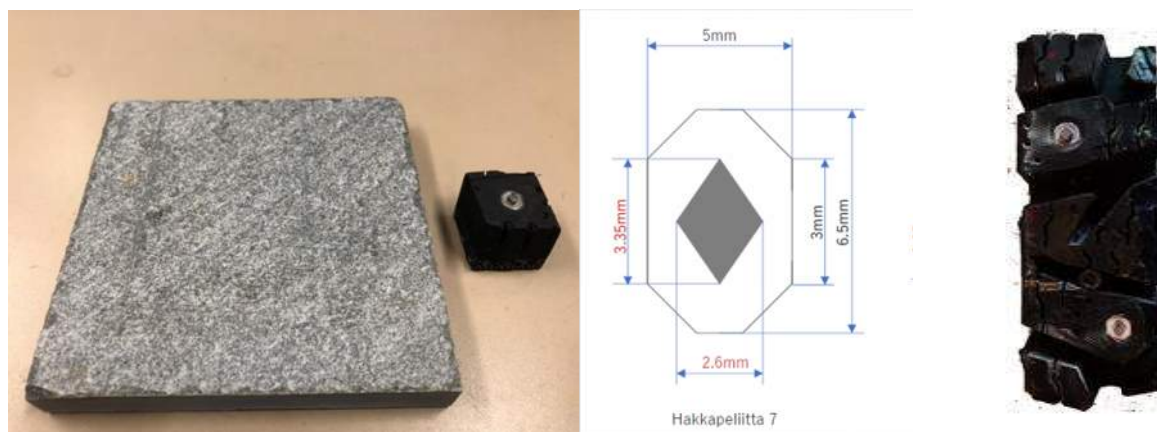
Prall är en metod som framförallt mäter utmattning av materialet genom stötförlopp. Prall saknar den abrasiva nötningen som orsakas av dubbens geometri, då en stålkula används i stället för en hårdmetallsdubb. Böhme ger en adhesiv - mild abrasiv nötning baserat på hårdhetskillnaden mellan provkropparna och vilket slipmedel man tillför i denna betonggolvsprovningssmetod. Även Böhme saknar helt den abrasiva nötningen som ges av dubbens formfaktor.



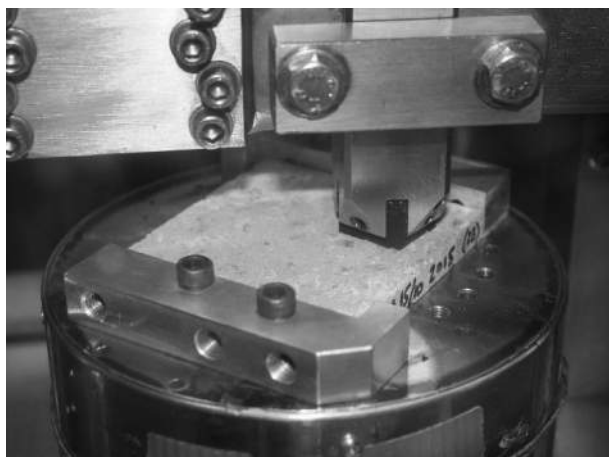
Figur.3. Skiss över pinne-på-skiva testriggen.



Figur 4. Foto över pendelprovsningsutrustningen med vägprovskropp och däckprovskropp påmonterad.



Figur 5. Till vänster: vägmaterielsprovskropp av sten och däckprovskroppar inför prov i pinne-på-skivamaskinen. Mitten: skiss över den provade dubbgeometrin. Till höger: däckprovskropp inför prov i pendelmaskin.



Figur.6. *Provuppställning med betongprovskropp monterad som skiva och dubbdäck monterad som pinne.*

Däckprovskropparna kommer från Nokian Hakkapeliitta 7 däck, som var inkörda 500 km (se Figur 5). Provserien genomfördes med fyra prov per vägmateriel och provutrustning. För pinne-på skiva maskinen var totala glidsträcken 5 m, normallasten 60 N och glidhastigheten 0,1 m/s. I pendelmaskinen var glidsträcken 120 mm per slag och medelnormallasten under ett slag var 20 N. Totalt 50 slag utfördes på varje vägprovskropp.



Figur 7. *Schematisk beskrivning av pendelprov. Till vänster startläge för prov. Mitten dubbdäcksprov går i kontakt med vägprov. Till höger dubbdäcksprov lämnar vägprov.*

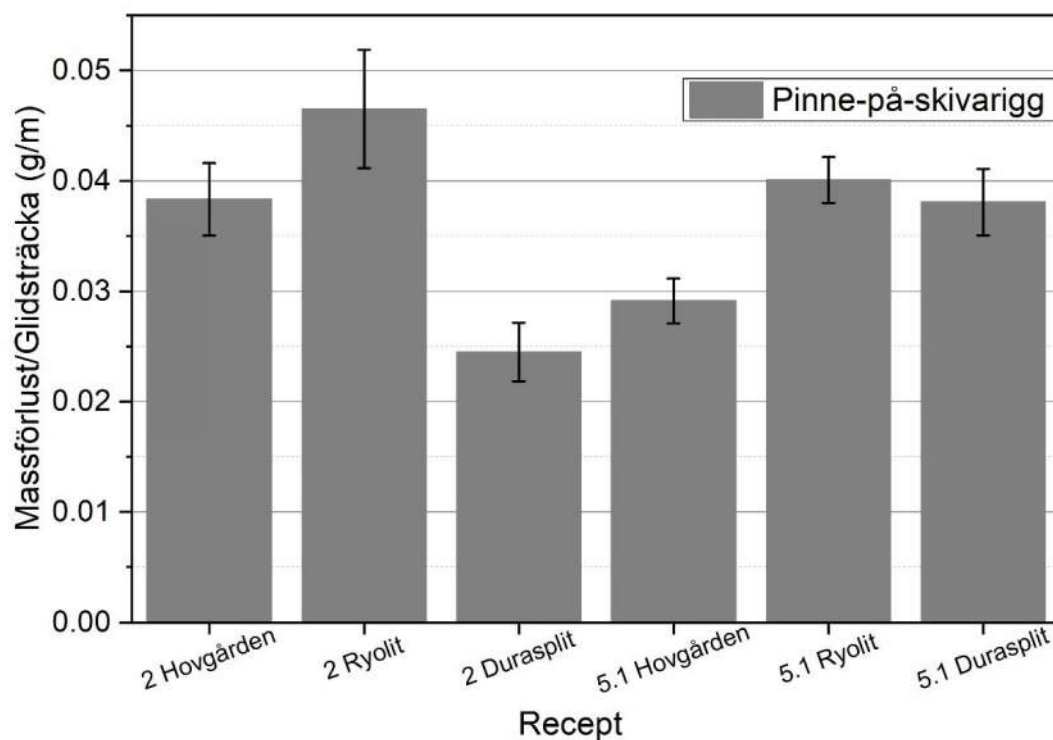
Före och efter provningarna vägdes provkropparna med en våg (Mettler Toledo XP20035, noggrannhet 1mg) för att mäta massan bortnött material. Innan vägning och innan prov i testutrustning, var provkropparna placerade i en klimatkammare med 50 % relativ luftfuktighet och en temperatur om 22 °C i 24 h. En hårdhetsmätare, Krautkrämer Dynamics, som mäter enligt LEEB hårdhetsvärde (HL), vilket är ett förhållande av rekyllhastigheten och anslagshastigheten användes på betongprovskropparna. HL-värdet konverteras sedan till hårdhetsvärden enligt Vickers. Tio hårdhetsmätningar genomfördes på ballastdelen, och tio genomfördes på cementpastadelen. Hårdhetsmätaren kalibrerades med en hårdhetsnormal före och efter mätning, och avvikelser från hårdhetsnormalen av stål var 3 HV i medelvärde på 10 mätningar 3 HV.

Resultat

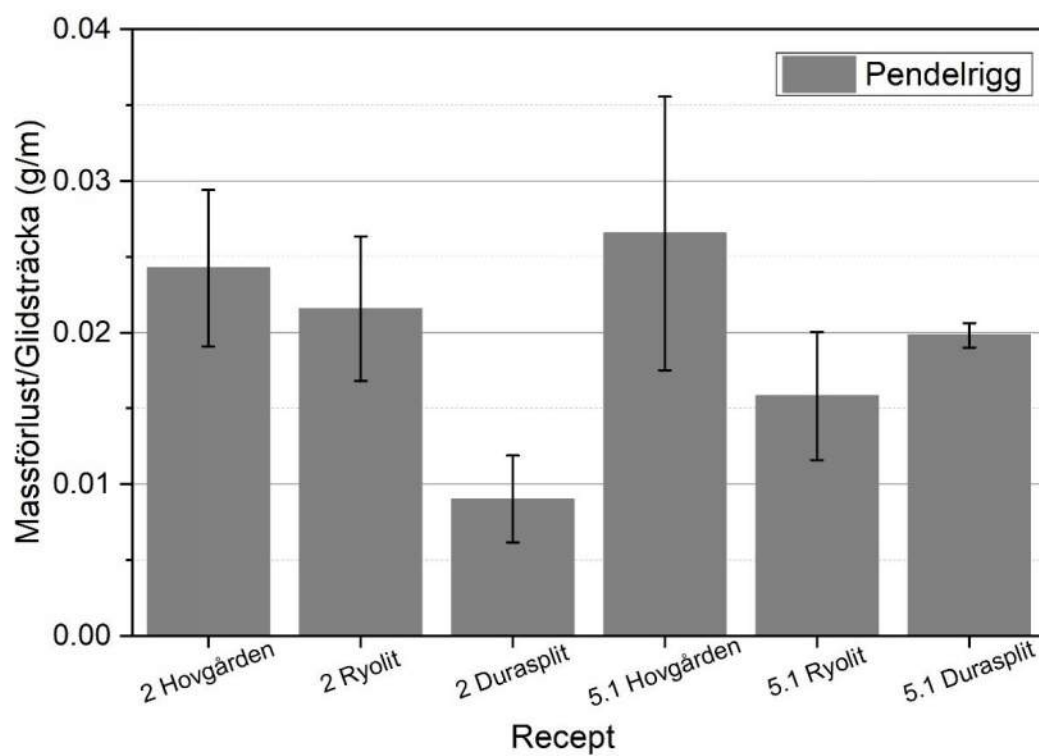
Figur 8 och 9 visar nötningen för respektive betongrecept i form av massförlust dividerat med sträcken som dubben har glidit mot materialet för pinne-på-skivaprov respektive pendelprov. Figur 10 visar hårdheten för respektive betongrecept i enheten Vickers. Jämför man Figureerna 8 och 9 ser man att nötningen visade lägst värde i båda testutrustningarna för Betong 2 Durasplit. Hårdhetsresultaten presenterade i Figur 10 visar ett likartat medelvärde för de olika stenmaterialens hårdhet vid parvis

jämförelse, med ballast av Durasplit som hårdast material. Figur 11 visar foton över de provade betongrecepten efter prov i pinne-på-skivamaskinen. På en del ytor syns spår efter dubbstiftets kontakt med vägmaterialets yta.

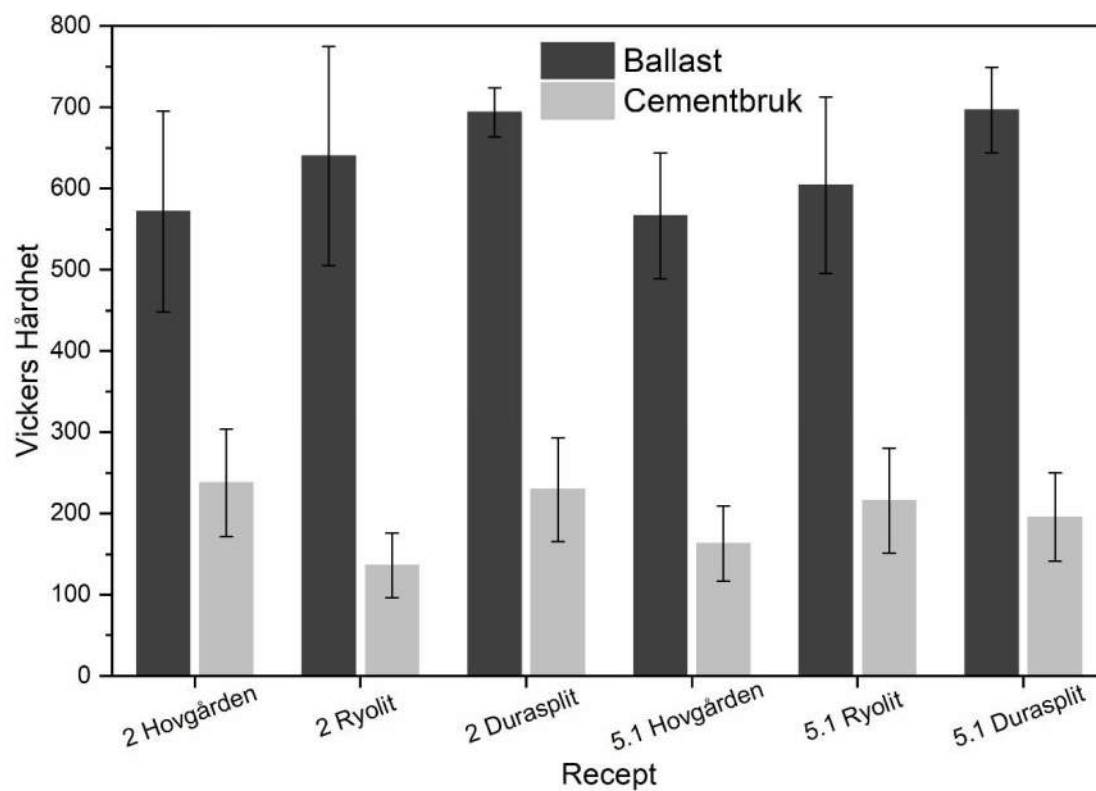
Figur 12 visar resultatet från provningen i Böhme och Figur 13 resultatet från provningen i Prall på de olika betongrecepten. Man kan notera att Prallproven och Böhme proven rankar vägmaterialets nötningsmotstånd annorlunda än resultaten från pinne-på-skiva- och pendelproven. Prov 2 Hovgården visar lägst nötning vid Böhme prov och för Prallprov visar prov 5.1 Ryolit lägst nötning.



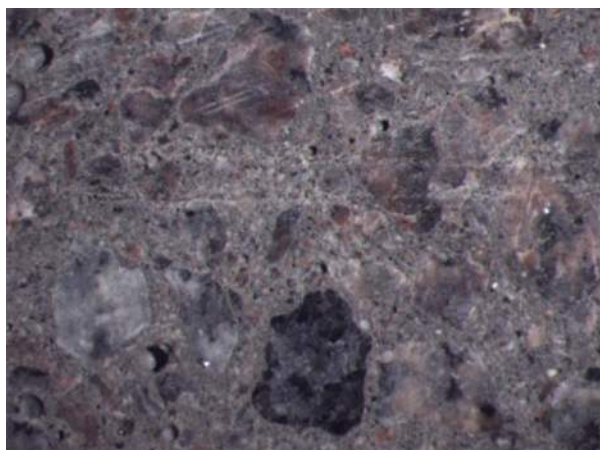
Figur 8. Nötningsresultat från pinne-på-skivaprovning



Figur 9. Nötningsresultat från pendelprovning



Figur 10. Resultat Hårdhetsmätning på ballast och cementbruk.



Betong 2 Hovgården



Betong 5.1 Hovgården



Betong 2 Durasplit



Betong 5.1 Durasplit

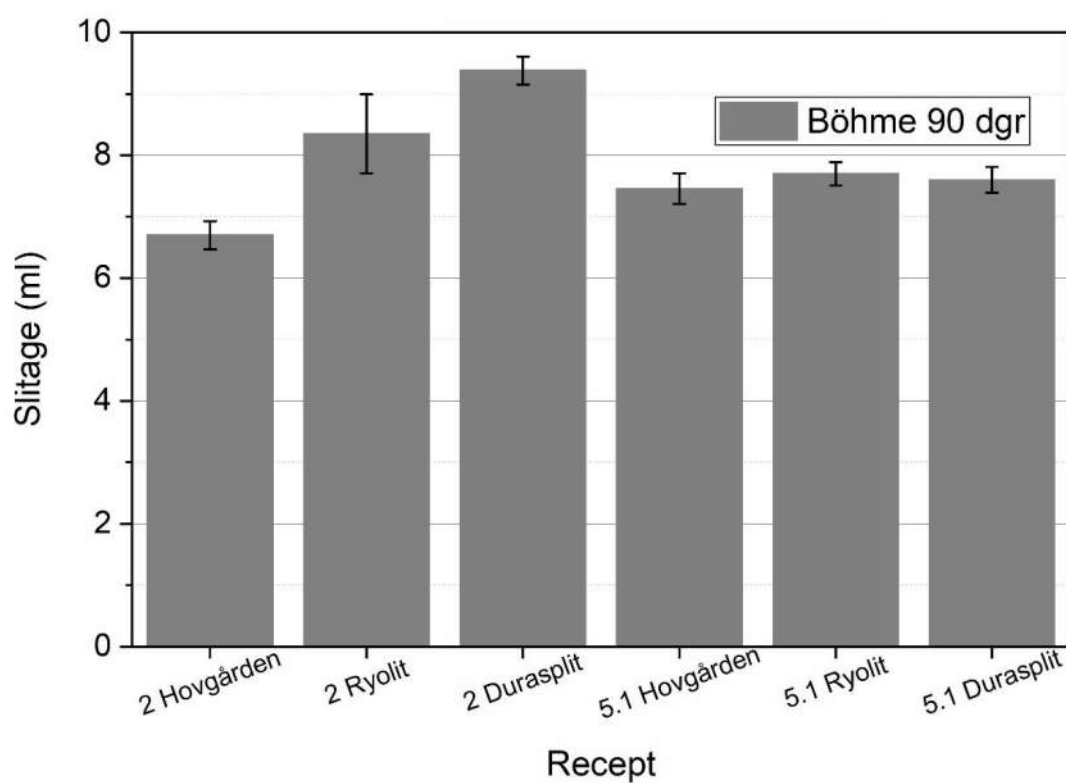


Betong 2 Ryolit

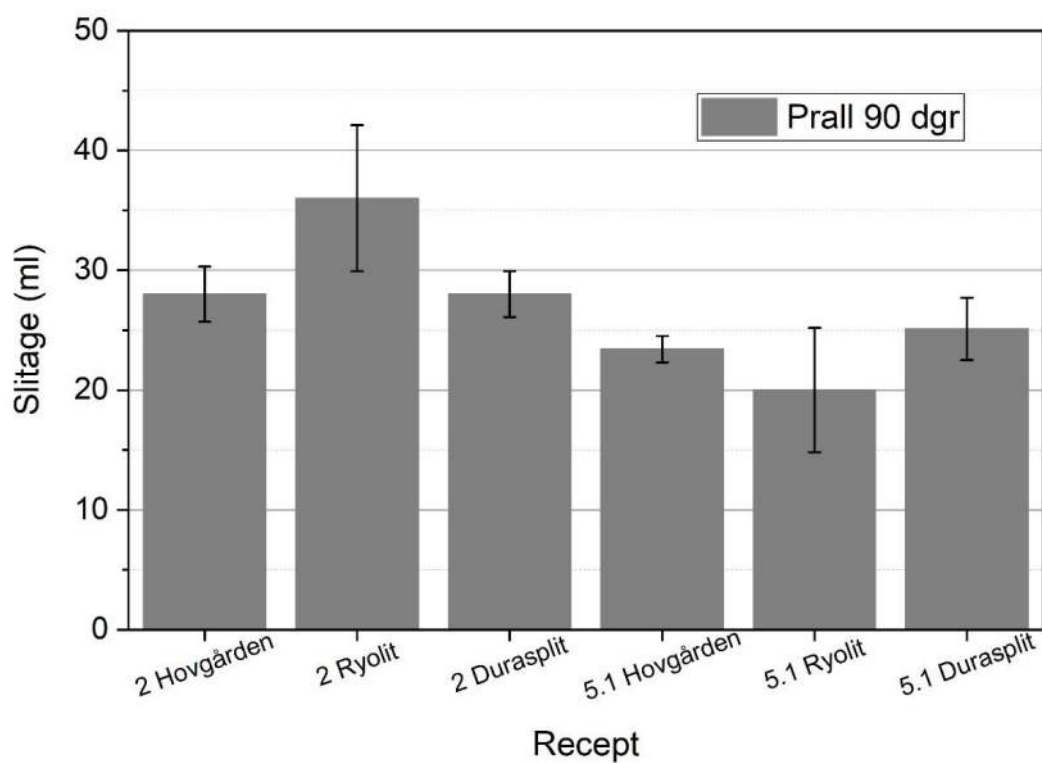


Betong 5.1 Ryolit

Figur 11. Fotografier av provade vägmateriälytor, storlek på avbildad yta 30 x 40 mm.



Figur 12. Resultat Böhmeprovning



Figur 13. Resultat Prallprovning

Diskussion

Tabell 2 presenterar hur vägmaterialet rankas i de olika provmetoderna efter tre månaders härdning. Rankningen är 1 – 6, där 1 är lägst uppmätt nötning och 6 är högst uppmätt nötning för respektive provmetod. Den uppmätta hårdheten rankas också 1 – 6, där 1 är högst och 6 är lägst uppmätt hårdhet. Av tabell 3 framgår att Pinne-på-skivaprov och pendelprov rankar på samma sätt som ballasthårdhet vad gäller det mest nötningsbeständiga materialet ”2 Durasplit”. För Prallprovningen visar ”5.1 Ryolit” lägst nötning och ”2 Durasplit” rankas som nummer fem vad gäller nötningsbeständighet. För Böhmeproven så visade resultaten att ”2 Hovgården” redovisade lägst nötning och ”2 Durasplit” rankas som nummer sex vad gäller nötningsbeständighet.

En sammanställning för de olika provningsmetoderna för utvärdering av dubbdäcksnötning av vägbeläggningar ges i Tabell 3. Pendelprovningen använder båda provkropparna som finns i kontakten mellan dubbdäck och vägbana, och simulerar båda två mekanismer som dokumenterats för dubbdäcksnötning av vägbana: glidande nötning och nötning orsakad av stötförlopp. Pinne-på-skivaprovningen använder också båda provkropparna från kontakten mellan vägbana och dubbdäck, men simulerar bara den glidande kontakten. Böhmeprovning använder en av provkropparna och en av nötningsmekanismerna i utvärderingen (vägmaterialet och glidande nötning). Prallprovningen använder också en av provkropparna och en av nötningsmekanismerna i utvärderingen (vägmaterialet och nötning orsakad av stötförlopp). Från ett systemperspektiv så brukar man rekommendera att använda provningsmetoder, som använder båda ytorna i kontakt, och som samtidigt påverkar med korrekta nötningsmekanismer [13].

Tabell 2. Rankning av resultaten från olika provmetoder efter tre månaders härdning av betongvägmaterialet.

	Prall 90	Böhme 90	Pinne-på-skiva	Pendel	Hårdhet (ballast)
2 Hovgården	4	1	4	5	5
2 Ryolit	6	5	6	4	3
2 Durasplit	5	6	1	1	1
5.1 Hovgården	2	2	2	2	6
5.1 Ryolit	1	4	5	5	4
5.1 Durasplit	3	3	3	3	2

Tabell 3. Laboratoriemetoder och dess användningsområden för utvärdering av olika nötningsprocesser i kontakt mellan dubbdäck och vägmateriäl.

	Prall	Böhme	Pinne-på-skiva	Pendel
Dynamisk nötning	x	-	-	x
Glidande nötning	-	x	x	x
Dubbdäck inkluderade dubb	- (stålkulor)	- (gjutjärnska)	x	x
Tillsatt slipmedel	-	x	-	-
Tillsatt vatten	x	x	ⁱ	ⁱ

i) Möjligt att variera mellan torr och våt nötning.

Enligt Rabinowicz nötningslag för abrasiv nötning [14] så är volymen avnött material invers proportionell mot hårdheten hos det hårdaste materialet i kontakten. Detta innebär att ju mindre hårdhetskillnad mellan provkropparna, desto mindre nötning. Jämför man Figurerna 8 och 9 med Figur 10 ser man att nötningen

visade lägst värde i båda testutrustningarna (pinne-på-skiva och pendel) för vägmateriäl ”2 Durasplit”. Stenen Durasplit är samtidigt den sten som visar högst värde på hårdhetsproven (Figur 10). Detta resultat, att hårdare sten leder till minskad nötning, är i överensstämmelse med tidigare resultat presenterade i [4] och [15]. Vägmateriäl ”5.1 Durasplit” uppvisar samma medelnivå på hårdheten som Betong 2 Dt men en högre nivå på nötningen trots en högre cementhalt och större sten. Dock är vct 0,03 enheter lägre och ballastvolymen över 5 % större i vägmateriäl ”2 Durasplit”. Fler variabler än ballastens hårdhet påverkar förmodligen också vägbetongmaterialets nötning såsom total ballastvolym, Dmax och vct. En annan viktig faktor är vidhäftning mellan cementpasta och ballast [16].

Slutsatser

Fyra olika metoder har använts för att utvärdera betongvägmateriäls nötningsbeständighet mot dubbdäck. Resultaten visar på följande slutsatser:

- De två provutrustningarna där både provkropparna i kontakten används (pinne-på-skiva och pendel) rankar betongvägmateriälerna nästan motsatt mot provmetoderna med bara en provkropp i kontakt (Prall och Böhme)
- resultaten visar att vägmateriålet med hårdast ballast visade en signifikant lägre nötning vid pinne-på-skiva- och pendelprovning, men fler variabler som såsom total ballastvolym, Dmax och vct, påverkar också vägmateriälets nötning.

Tack

Denna rapport är en delrapport inom det av Trafikverket finansierade BVFF projektet ”Hållbara betongvägar”. Författarna tackar projektdeltagarna: Niklas Johansson Cementa, Sten Hjelm, Cementa, Iad Saleh, NCC Teknik, Thomas Johansson Skanska, Roger Nilsson Skanska, Mats Gustafsson VTI, Ellen Dolk VTI, Åsa Laurell Lyne, Rise CBI Niklas Johansson Heidelbergcement, Björn Kullander Trafikverket, Johan Silwerbrand KTH, och Erik Simonsen Cementa för värdefulla synpunkter under projektet.

Referenser

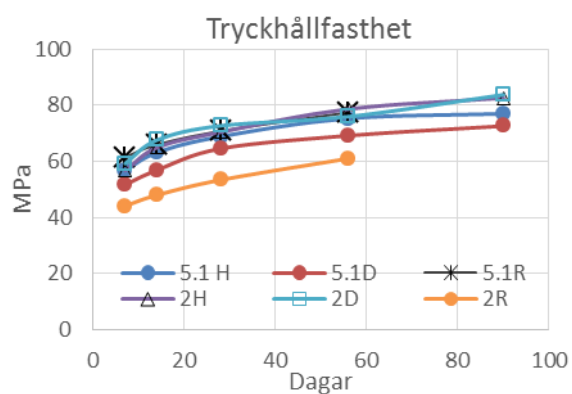
1. Vägverket, *Uppdrag att utreda möjliga åtgärder för att minska partikelemissionerna från slitage och uppvirvling från vägtrafiken*. Regeringsuppdrag 2006-06-21, 2006. N2006/4800 TP.
2. Jacobson, T., *Slitstarkare beläggningar för framtiden*. Trafikverket Workshop, 2013.
3. standard, E., *EN 12697-16:2016*, in *Bituminous Mixtures - Test Methods - Part 16: Abrasion by studded tyres (Prall)*. 2016, CEN: Brussels.
4. Olofsson, U., et al., *Nötning och luftburna partiklar från kontakten mellan dubbdäck och betongvägar – en laboratiestudie i en pinne-på-skiva maskin*. Institutionen för Maskinkonstruktion KTH, 2018. TRITA-MMK 2018:01.
5. Sánchez, G., *TEST DEVELOPMENT AND SIMULATION OF THE BRITISH PENDULUM TESTER FOR STUDED TIRES WEAR*. Maskinkonstruktion KTH, 2017. M. Sc. Thesis(MMK 2017:72): p. MKN 182.
6. Kozuka, R., *Studded tire wear - comparison between British Pendulum and Pin on disc testing*. Maskinkonstruktion KTH, 2017. M. Sc. Thesis(MMK 2017: MKN 188).
7. *SS-EN 1097-9*, in *Ballast – Mekaniska och fysikaliska egenskaper – Del 9: Bestämning av motstånd mot nötning av dubbdäck*. 2003, SIS: Stockholm.
8. *SS-EN 13982-3*, in *Methods of test for screed materials - Part 3: Determination of wear resistance - Böhme*. 2014, CEN: Brussels.
9. Gustafsson, M., L. Kraft, and U. Olofsson, *Moderna Betongbeläggningar - Utveckling mot mindre slitage och partikelemission*, in *VTI rapport 982*. 2019: VTI, Linköping. p. 96.

10. Snilsberg, B., et al., *Evaluation of different laboratory methods for simulation of pavement wear and road dust generation from studded tires*. Road Materials and Pavement Design, 2008. Volume 9 (Issue sep1: SPECIAL ISSUE ON ASPHALT TECHNOLOGY): p. 287-304.
11. *SS-EN 12390-3:2009*, in *Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens*. CEN: Brussels. p. 19.
12. *SS-EN 12390-6:2009*, in *Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens*. CEN: Brussels. p. 11.
13. Jacobson S och Hogmark S., *Tribologi - Friktion, smörjning och nötning*, Liber 1996.
14. Straffelini G., *Friction and wear - methodologies for design and control*, Springer 2015.
15. Olofsson, U. och Lyu Y., *Nötning och luftburna nötningspartiklar från kontakten mellan dubbdäck och betongvägar – en laboratoriestudie av fem vägbetongblandningar och två stenmaterial i en pinne-på-skiva maskin* Institutionen för Maskinkonstruktion KTH, 2019. TRITA-ITM-RP 2019:1.
16. Peterson, Ö. and A. Johansson, *En undersökning av slitstark vägbetong med frilagd ballast*, in *CBI Uppdragsrapport 95093*. 1995, Swedish Cement and Concrete Research Institute: Stockholm.

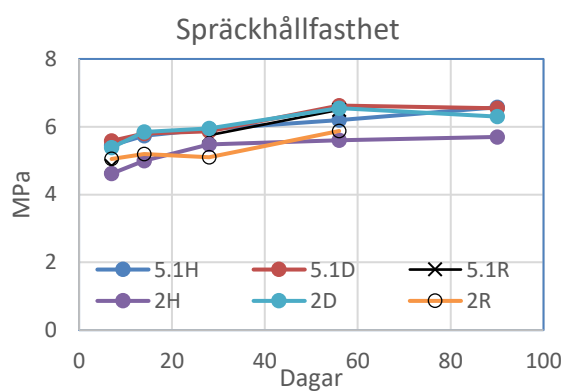
Appendix 1

Tabell 1.1 Kulkvarnsvärde N_A för ingående ballast.

Ballast (mm)	Kulkvarnsvärde
Hovgården 8-11	5,1
Hovgården 11-16	6,3
Durasplit 8-11	6 – 7
Durasplit 11-16	6 – 7
Ryolit 8-11	4,5
Ryolit 11-16	4,5



Figur A1,1. Tryckhållfasthet



Figur A1,2. Spräckhållfasthet.

Bilaga D: Fullskaletester i VTI:s provvägsmaskin

Mats Gustafsson, VTI

2020-09-08

Inledning

I delprojekt C har slitagetester utförts i VTI:s provvägsmaskin (PVM), se Figur 1. Provpaltor för PVM tillverkades på Cementa Research i Slite. Totalt blandades sju recept. Samtliga blandningar utfördes med lågt vct och luftinblandning för att klara exponeringsklasser XD3/XF4. Tillverkade plattor transporterades till VTI för montering i PVM.

Provpaltor tillverkades utifrån följande sju recept, utvecklade i delprojekt B:

- 5C: Ett recept med bra Prall, utan silika och relativt högt vct.
- 7A: Referens med dåligt kulkvarnsvärde.
- 4H-2L: Ballast från Hovgården med luft och silika. Alt till Torphyttan. Bästa resultatet från Hovgården.
- 5H-2L: Ett av de bästa recepten map Prall.
- 5F-3L: Bra Prall värden (<20) med mkt lågt vct och mkt silika, samt stenmjöl.
- 5F-4L: Bästa resultatet map Prall, mindre partikelsprång med stenmjöl, moderat cementhalt.
- 5O: Amerikanskt recept med ok Prallvärde, relativt god arbetbarhet, få partikelsprång, ingen silika och relativt låg cementhalt.

VTI:s provvägsmaskin är en utrustning som kan användas för att studera slitage och partikelemissioner som bildas i interaktionen mellan däck och vägbana. Provvägsmaskinen består av en cirkelrund 0,5 m bred och 15 meter lång som kan beläggas med valfri vägbeläggning. Maskinen roterar kring en centralt placerad vertikal axel på vilken sex hjulaxlar är monterade. På dessa kan olika typer av däck monteras. Fyra av axlarna är i drift och drivs av elmotorer. Vid provning sänks hjulen ner mot banan till önskat axeltryck och hjulen driver sedan maskinen att rotera. Hastigheten kan varieras steglöst upp till 70 km/h. I hastigheter över 30 km/h kopplas en excenterrörelse in vilket gör att hjulen inte kör i samma spår utan rör sig över nästan hela banbredden.

Hallen som maskinen står i kan kylas ner till under 0°C (beroende på årstid) och luftfuktigheten kan regleras. Beläggningarna som ska testas körs normalt först in. Inkörning av beläggningen innebär att det ytliga skiktet slits bort med hjälp av dubbdäckskörning under vattenbegjutning av banan enligt ett standardförfarande. Detta görs för att frilägga stenmaterialet så att belägningsytan är mer lik en normalt sliten beläggning. Standardinkörning innebär ca 20 000–30 000 varv i 70 km/h.



Figur 1. VTI:s provvägsmaskin (PVM).

Slitagetester metodik

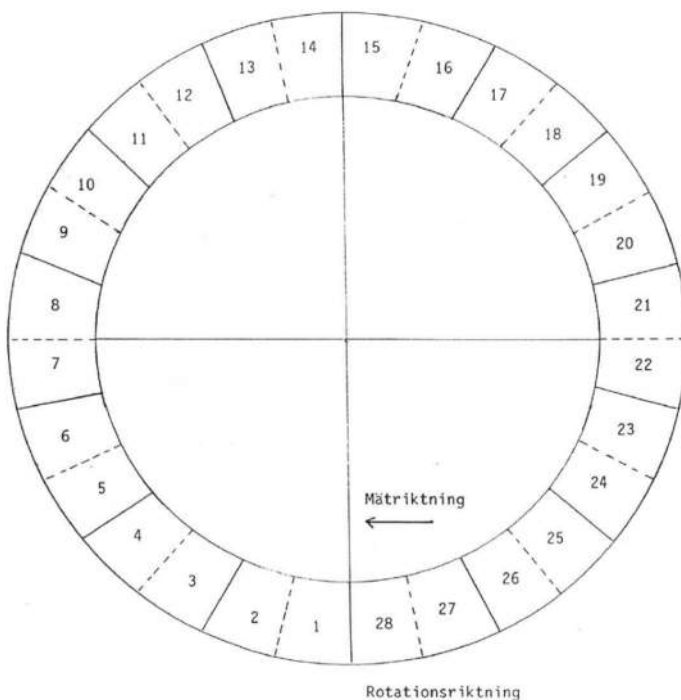
Provvägsmaskinen körs i 70 km/h i temperaturer strax under 0 °C, för att simulera vinterförhållanden. Dubbdäcken som används i detta test är Nokian Nordman 7 med dimensionen 205/55 R16 med 127 dubbar per däck. Var 30 000^{de} varv stannas maskinen och slitaget mäts på samtliga plattor med laserbalk, som mäter i en diagonal profil på varje platta. Dubbutsticket mäts på ett urval av 10 dubbar på varje däck. Första slitageomgången körs torr, därefter varannan med vattenbegjutning.

Då den första omgången däck tappade en del dubb, ersattes denna efter 150 000 varv med en mindre sliten uppsättning av samma däckmodell, inköpt vid samma tillfälle som den första.



Figur 2 Dubbdäck av modell Nokian Nordman 7, som användes vid testerna.

För att få lika mycket data från alla provade recept valdes att bygga fyra plattor av de sju nämnda recepten ovan. I Figur 4 visas belägningsplattornas numrering i PVM och i Tabell 1 hur plattorna placerades. Placeringen baseras på receptens Prall-värden och har ordnats så att slitstyrkan ska förändras gradvis runt ringen. Detta för att minimera risken för att stora skillnader i slitstyrka ska orsaka plötsliga nivåskillnader efter en tids slitage, vilket kan resultera i hoppande däck, som i sin tur kan skapa ojämnheter och skador på belägningsplattorna.



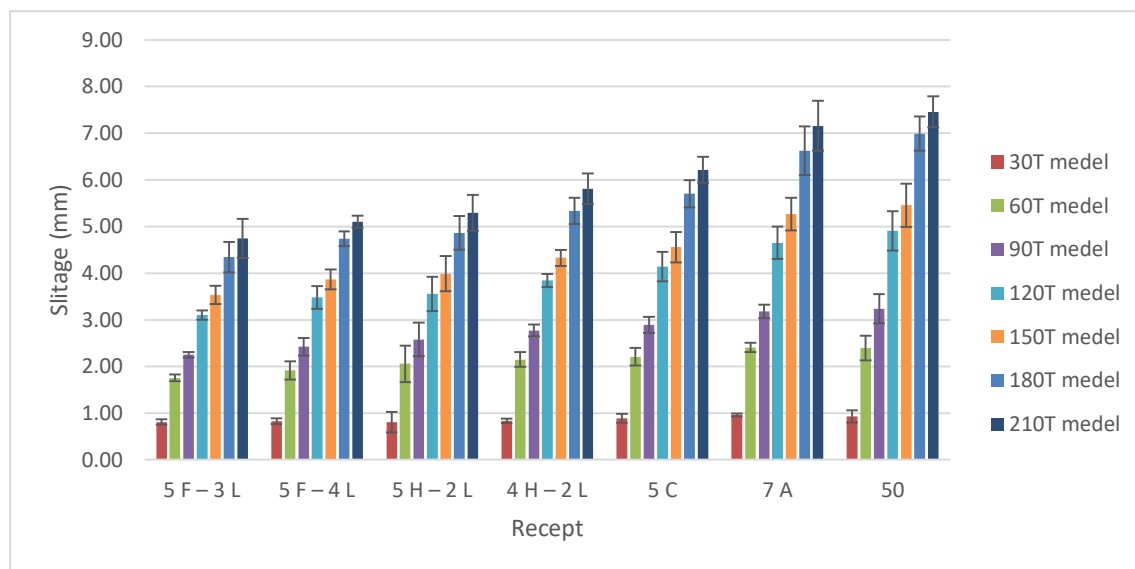
Figur 3 Beläggingsplattornas numrering i PVM

Tabell 1. Beläggingsplattornas placering i PVM.

Form nr	Form nr	Beläggingsbenämning	Prallvärde
1	2	5 F – 4 L	16,9
3	4	5 H – 2 L	18,9
5	6	5 F – 3 L	19,1
7	8	5 C	21,1
9	10	4 H – 2 L	22,0
11	12	5O	22,8
13	14	7A	30,6
15	16	7A	30,6
17	18	5O	22,8
19	20	4 H – 2 L	22,0
21	22	5 C	21,1
23	24	5 F – 3 L	19,1
25	26	5 H – 2 L	18,9
27	28	5 F – 4 L	16,9

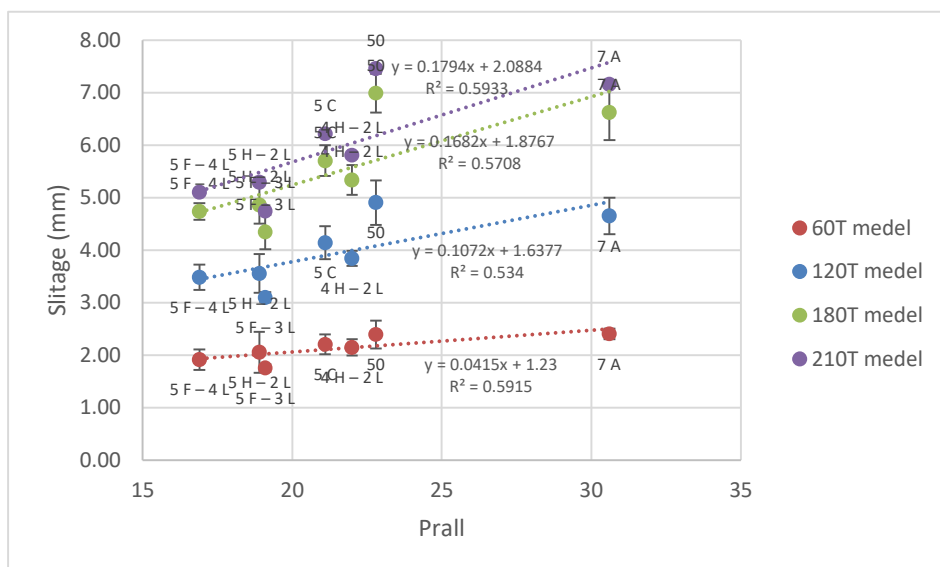
Resultat körningar med provvägsmaskinen

Förhållandet mellan de olika beläggningarnas slitagebenägenhet är oförändrat, dvs 5F-3L slits minst och referensen 7A och det amerikanska receptet 50 slits mest (Figur 4).



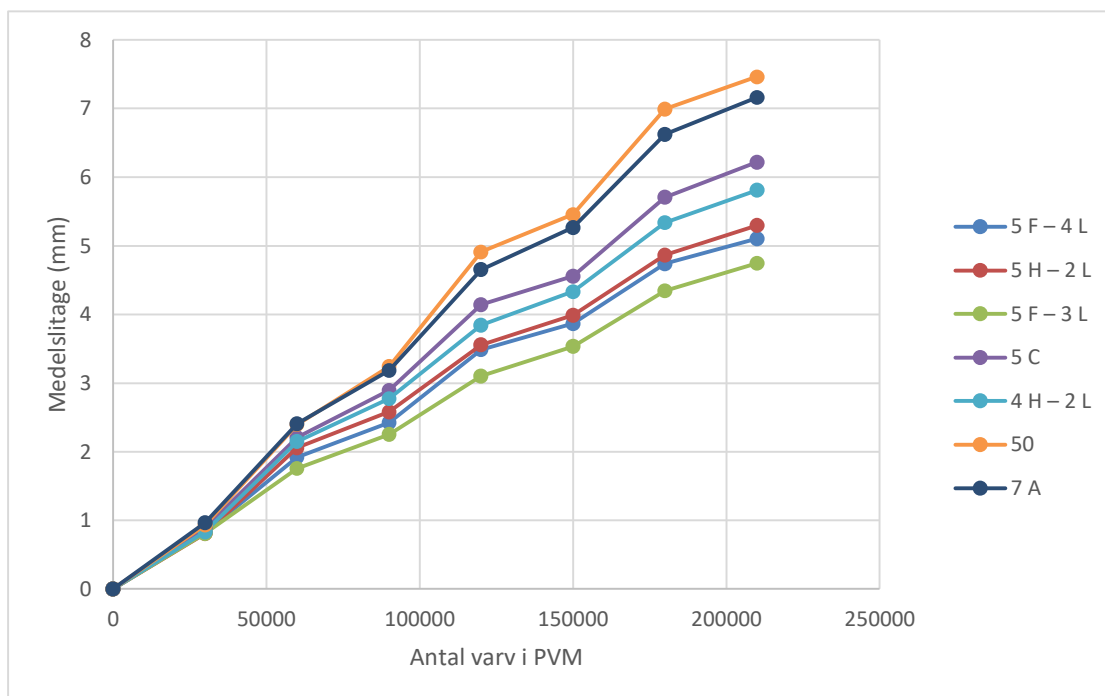
Figur 4 Medelslitage för 4 plattor med standardavvikelse sorterat i storleksordning.

Relationen till Prall-värdena håller i sig även efter 210 000 varv. Fortsatt är det recept 50, som trots hyfsat Prall-värde, avviker mest från regressionslinjen (Figur 5).

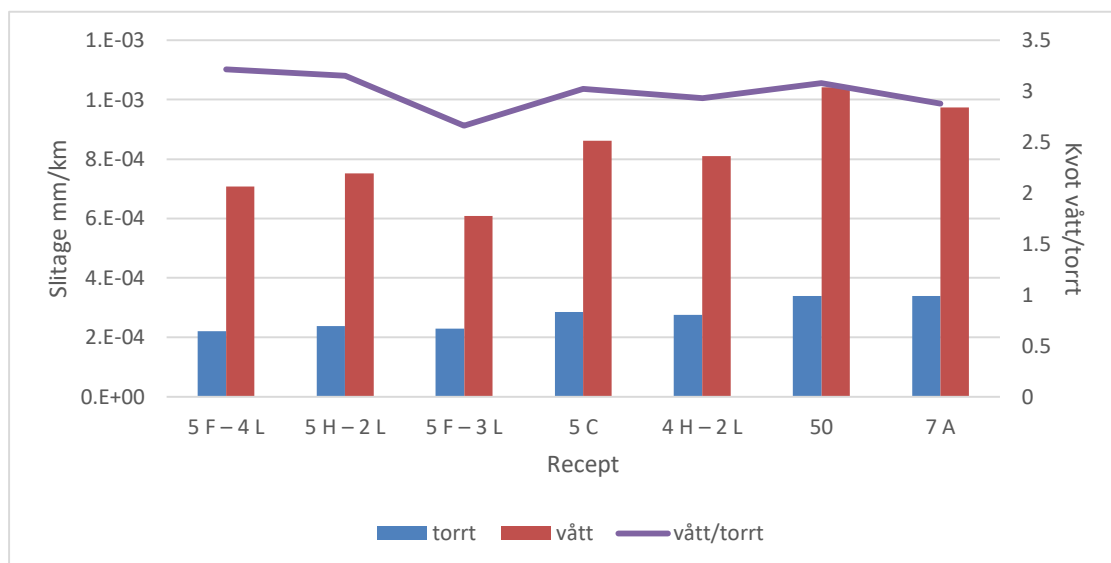


Figur 5 Medelslitage som funktion av Prall-värde efter 60 000, 120 000, 180 000 och 210 000 varv.

Slitagekurvan visar fortsatt omväxlande snabbare och långsammare slitage vid torra och våta cykler i PVM (Figur 6). I Figur 7 har medelslitaget i mm/km vid torra och våta cykler beräknats. Våtslitage varierar mer än torrslitage. Kvoten är något lägre för det bäst presterande receptet 5F-3L, främst beroende på att våtslitage är lägre än för övriga recept.



Figur 6 Medelslitageutveckling efter 210 000 varv.



Figur 7 Medelslitage i mm/km samt kvot mellan medelslitage under torra och våta slitageomgångar i PVM.

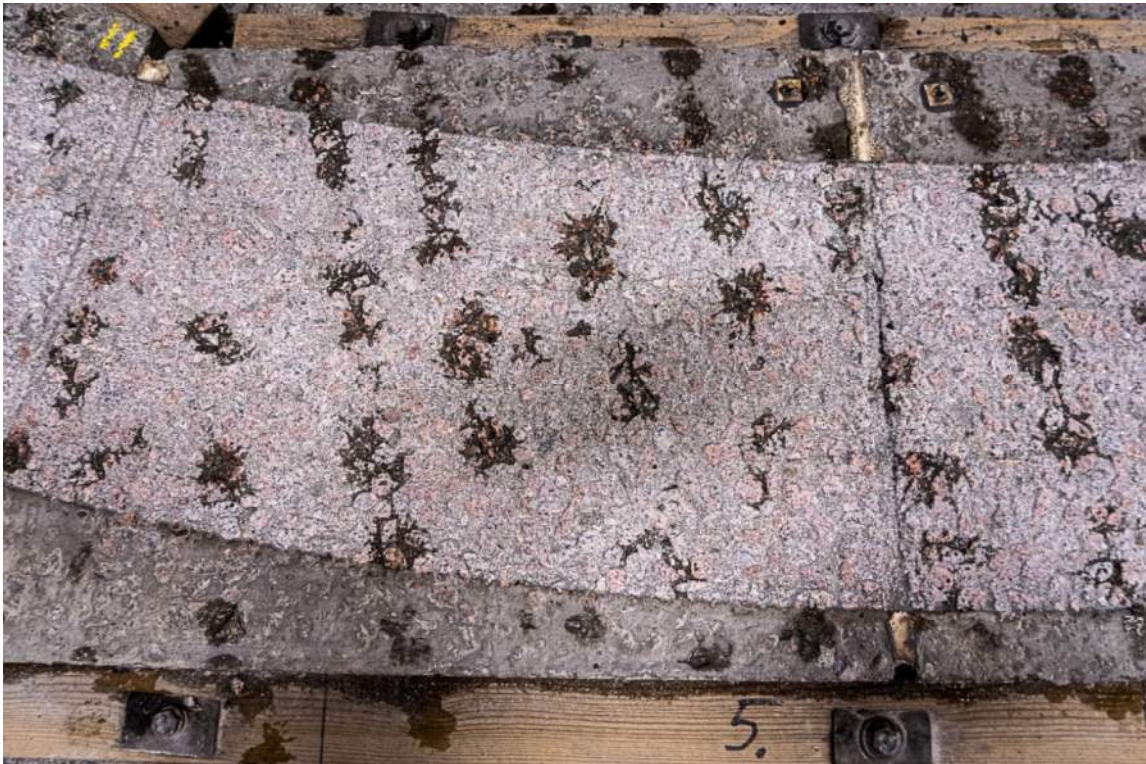
Några bilder på plattorna efter 120 000 varv



Figur 8 5F-4L



Figur 9 5H-2L (fläckar är kondensdropp från taket)



Figur 10 5F-3L (fläckar är kondensdropp från taket)



Figur 11 5C



Figur 12 4H-2L



Figur 13 50



Figur 14 7A

Diskussion och slutsats

Då förhållandet mellan beläggningarna är detsamma och ingen avvikande trend kan noteras avbryts testerna efter 210 000 varv och fokus läggs på att korrigera för dubbens förändringar för att, om möjligt, jämföra resultaten med tidigare tester.

Utifrån testerna kan dras slutsatserna att:

- Massa 5F-4H, 5H-2L och 5F-3L är ungefär lika slitstarka och bättre än 4H-2L och 5C, dessutom ännu bättre än 5O och 7A vid torr bana.
- Massa 5F-4H, 5H-2L och 5F-3L är bättre än 4H-2L och 5C, dessutom ännu bättre än 5O och 7A, när det gäller avnötning vid våt bana och även i genomsnitt.
- Massa 5F-3L är dessutom bättre än 5F-4H och 5H-2L när det gäller avnötning vid våt bana.

Resultaten från testerna i PVM visar att slitaget på samtliga beläggningar är 2–2,5 gånger högre under våta förhållanden än under torra.

Korrelationen mellan slitaget och receptens Prallvärden är hög vid torra förhållanden ($R^2=0,74$) och medelhög vid våta ($R^2=0,49$). Det kan noteras att receptet 5F-3L genomgående har lägst slitage trots endast tredje lägsta Prallvärde.

Två material som provats i ett tidigare projekt kunde jämföras med resultaten från föreliggande projekt. Ett av dem hade under våta förhållanden nästan lika lågt slitage som det bästa receptet i föreliggande studie, medan båda hade högre slitage än fem av de sju nya recepten vid torr vägbana.

Bilaga E: Underhåll och Reparationsmetoder

Roger Nilsson, Skanska Sverige AB

Iad Saleh, NCC Sverige AB

Henrik Bjurström, VTI

Björn Kullander, Trafikverket

2022-03-28

Innehåll

1. Inledning.....	3
1.1. Bakgrund.....	3
2. Funktionella egenskaper Skadetyper, skadeinventering	4
3. Sammanställning av underhålls- och reparationsåtgärder	7
4. Studiebesök England & USA	13
4.1 Studiebesök i England, tester på M1	13
4.2 Studiebesök i USA, slipning (NGCS) på US290 utanför Huston	15
4.3 Studiebesök, Golden Triangle Construction, Pennsylvania, USA.....	23
5. Slutsatser	25
6. Referenser	26

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Nedbrytning av vägöverbyggnader orsakas främst av yttre trafiklaster samt klimateffekter. I Sverige tillåts bland världens högsta fordonsvikter, BK4 (74t). Vidare tillåts dubbade vinterdäck som sliter på vägbanan och genererar vägpartiklar. Perioder med låga temperaturer kan orsaka tjällyft i undergrundsmaterial under särskilda förutsättningar. Vidare kan b.l.a. salt som används vid vinterunderhåll bidra till en snabbare nedbrytning av vägmateriäl.

Effekten av dessa faktorer hanteras genom att beakta erforderlig dimensionering, val av ingående material & sammansättning, rätt utförande samt lämpliga underhålls- och reparationsåtgärder i rätt tid.

En förutsättning för att erhålla en kostnadseffektiv betongväg med lång livslängd är att alla nedanstående delar kan värderas och hanteras:

- Erforderlig dimensionering
- Val av ingående material & sammansättning
- Rätt utförande
- Lämpliga underhålls- och reparationsåtgärder i rätt tid

Korrekt dimensionering hanteras genom att beakta relevanta förutsättningar under vägens dimensionerande livslängd så att överbyggnaden kan erbjuda en trafiksäker och jämn vägyta för rådande trafiklaster ($\text{ÅDT}_{t,k}$), tillgängliga överbyggnadsmaterial, typ av undergrund, klimateffekter mm. En fullgod dimensionering är grunden till att uppnå en lång livslängd. Värt att notera är att de yttre förutsättningarna är samma för en specifik väg förutom val av vägbyggnadsmaterial.

Val av ingående material och sammansättning hanteras genom att välja rätt material och recept som klarar av kritiska påkänningar i överbyggnaden samt övrig påverkan utan att nedbrytas under avsedd livslängd. Om fel material väljs kommer överbyggnaden inte att prestera som tänkt med kortare livslängd och ökade underhålls- och reparationskostnader. Oavsett vilka material som väljs i överbyggnaden måste de kunna hantera avsedda laster samt rådande förutsättningarna i den avsedda miljön (vägsalt, tjäle, etcetera).

För att avsedd funktion skall erhållas måste utförandet ske på ett korrekt sätt under rätt förutsättningar. Ett undermåligt utförande bidrar till accelererande nedbrytning och kortare livslängd.

Alla material och överbyggnader bryts ner över tid och behöver underhållas och repareras för att erhålla en kostnadseffektiv, hållbar samt förväntad livslängd. Det är även viktigt att lämpad underhålls- eller reparationsåtgärd sätts in i rätt tid. En förutsättning för att kunna välja rätt åtgärd i rätt tid är att förstå överbyggnadens tillstånd samt orsaken till nedbrytningen (dvs. observerad skada).

Genom att hantera och beakta dessa fyra delar (dvs dimensionering, materialval, utförande och underhålls- och reparationsåtgärder) skapas förutsättning för en hållbar och kostnadseffektiv betongväg med förväntad livslängd. Om någon av dessa delar inte kan realiseras kommer vägens funktionella och strukturella egenskaper inte att uppnås och kräva omfattande underhåll och reparationer (tex. bärighet, jämnhet, hjulspår, slitstyrka, friktion, partikel- och bulleremissioner).

Överbyggnadens livslängd innan större åtgärd definieras alltid av den nedbrytning som sker först. I en ideal situation bör en överbyggnad dimensioneras så att alla delar bryts ner samtidigt. I normalfallet eftersträvas att skador uppkommer i den övre delen av överbyggnaden som relativt enkelt kan åtgärdas.

I Sverige är slitage från dubbdäck en av den vanligaste nedbrytningen som måste beaktas. Dubbarna nöter bort beläggningen och orsakar på sikt hjulspår (slitagespår). Hjulspår ökar risken för vattenplaning och trigger ofta behov av åtgärd, framför allt på det högtrafikerade vägnätet. För det lågtrafikerade

vägnätet är de även materialrelaterade problem orsakade av klimateffekter (tex. åldring, fukt/vatten mm.) som föranleder åtgärder.

Dubbdäcksslitage orsakar samtidigt att beläggningssmaterial nöts bort och orsakar samtidigt skadliga vägp Partiklar. Slitage inverkar även på friktion, textur samt bulleremissioner.

För asfaltbeläggningar är det totala spårbildningen summan av nötning av dubbdäck samt plastiska deformationer i asfaltmaterialen samt eventuella deformationer i undergrunden. För betongvägar består spårbildningen främst av nötning. Betongvägar bör således kunna erhålla en lägre total spårbildning om andra faktorer är konstanta (exempelvis val av samma slitagesten i slitlager).

Det är väsentligt att uppkomna skador kan repareras samt att drift och underhållsåtgärder kan utföras på ett säkert, snabbt och effektivt sätt så att hög tillgänglighet med få och korta avstängningar kan erhållas.

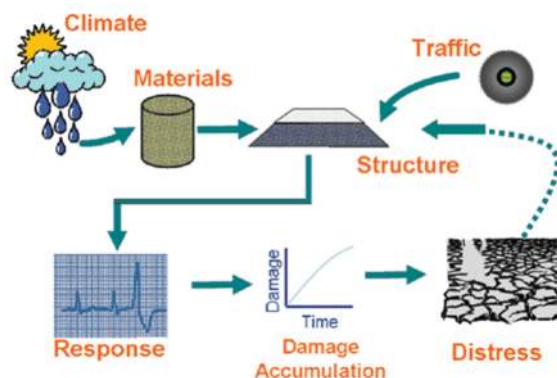
I kapitel 2 beskrivs relevanta funktionella egenskaper för en väg samt exempel på nedbrytning, skadeorsaker, skadeinventering samt utvärderingsmetoder.

I kapitel 3 ges en sammanställning av skadetyper samt relevanta underhålls- samt reparationsmetoder utifrån nyligen publicerade erfarenheter.

I kapitel 4 redovisas erfarenheter från studiebesök i England och USA där olika försök att återställa ytjämnhet, friktion samt bulleremissioner pågår. Speciellt fokus på reparation av hjulspår (slitagespår) behandlas/presenteras.

2. Funktionella egenskaper Skadetyper, skadeinventering

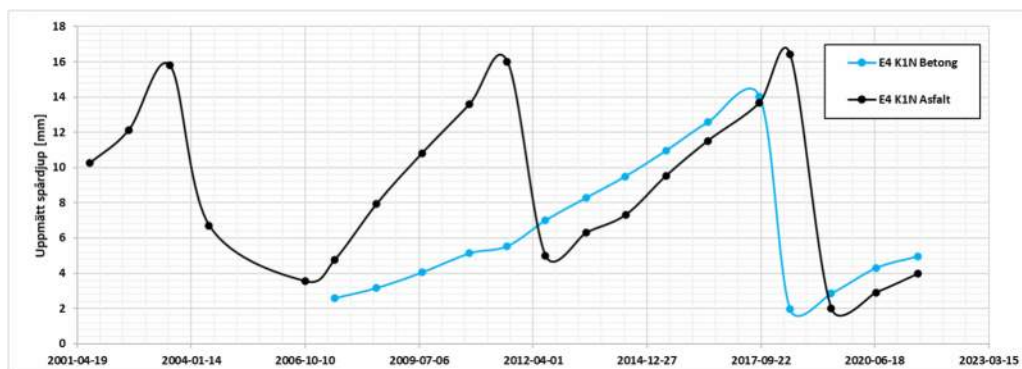
För att förstå hur en väg bryts ner samt kunna definiera överbyggnadens tillstånd samt prognostisering av nedbrytningen krävs kunskap om påverkande faktorer (ex. klimat, materialegenskaper, trafik, överbyggnadstyp m.fl.), påkänningar i överbyggnaden, nedbrytningssamband, etcetera. Vidare bör de olika faktorernas variation över tid beaktas. Det är således intill omöjligt att beakta alla faktorer utan att förenkla och generalisera. Det viktiga är att identifiera och beakta de mest relevanta faktorerna. I *Figur 1* visas ett överskådligt samband om hur en vägöverbyggnad bryts ner samt hur nedbrytningen kan beaktas.



Figur 1 Schematisk bild av påverkande faktorer och nedbrytningssamband

Genom att inventera vanligt förekommande vägsador erhålls en första indikation om relevanta nedbrytningstyper. Trafikverket gör regelbundet vägytemätningar för att inventera tillståndet på vägarna. Resultatet från dessa mätningar går att studera i PMSv3 (<https://pmsv3.trafikverket.se>). I databas finns mätdata över flera år dokumenterade så analyser över nedbrytningsförlopp kan enkelt tas fram.

Nedan ges ett exempelresultat på spårutvecklingen för E4:an förbi Uppsala (del med betong- samt asfaltöverbyggnad) samt IRI-utveckling på betongvägen, se Figur 2, 3, 4 och 5.

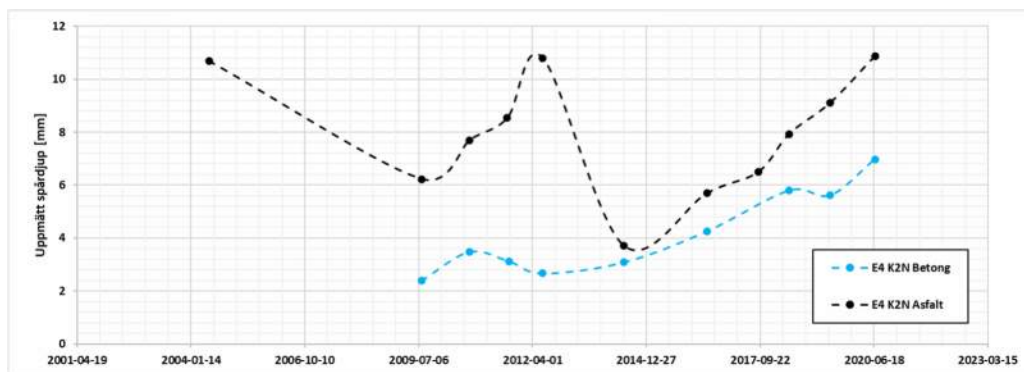


Figur 2 Spårutveckling på E4 förbi Uppsala (K1N, Betong/Asfalt)

Spårutvecklingen för asfaltöverbyggnaden ges av den svarta heldragna linjen. Spårutvecklingen är i snitt ca 2,5 mm per år vilket ger behov av omtoppning vart 5-6:e år. Spårutvecklingen för betongvägen ges av den blå linjen och är ca 1,1 mm per år, vilket ger behov av spårlagning vart 10:e år inräknat ett initialspår om ca 2 mm. I detta exempel har betongbeläggningen drygt dubbelt så lång livslängd med avseende på spår djup. Den sista delen av den blå linjen avser spårutveckling av asfalt (betongytan överlagd med asfalt)

Figur 3 visar spårutvecklingen för K2 i norrgående riktning. Eftersom det går färre fordon i K2:an förväntas mindre hjulspår vilket bekräftas av resultat från mätningarna. Det kan noteras att även för detta körfält är spårutvecklingen lägre för betongvägen om än skillnaden är lägre. Spårutvecklingen för betongen är i snitt ca 1 mm per år och ca 1,3 mm per år för asfaltbeläggningen.

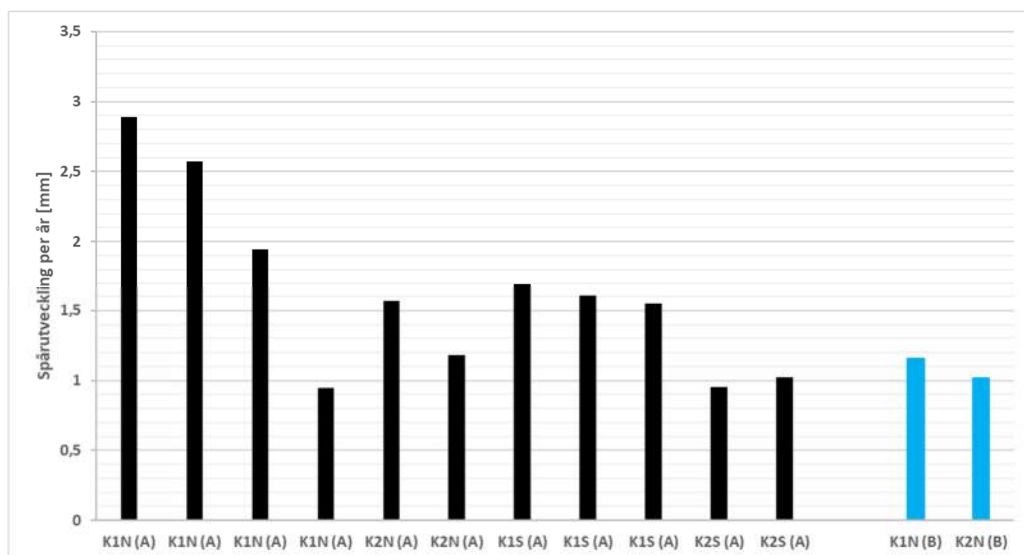
Värt att notera är att i betongen användes en blandning av slitagesten med olika egenskaper för att klara krav på kkv9 och för asfalten användes en sten som uppfyller krav om kkv 6. Om samma slitagsten (kkv6) använts till betongen hade skillnaden i spårutvecklingen varit ännu större. En orsak till detta är att betong inte har något tillskott av permanenta deformationer.



Figur 3 Spårutveckling på E4 förbi Uppsala (K2N, Betong/Asfalt)

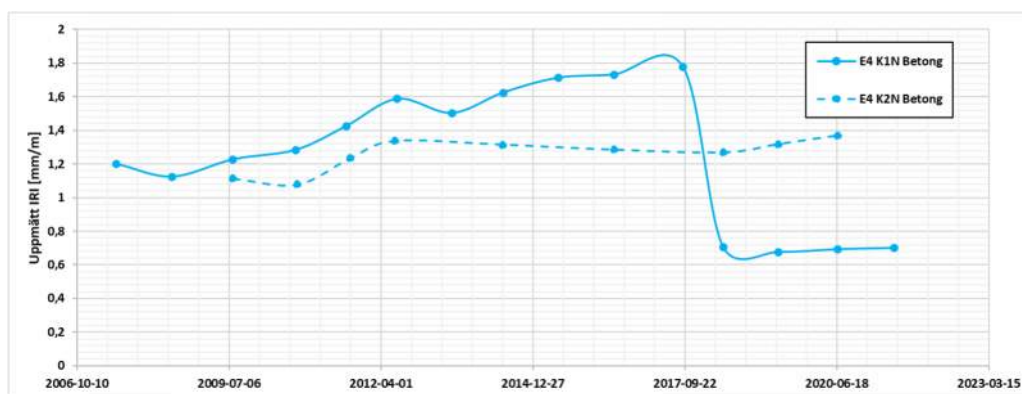
En sammanställning av spårutveckling för per år för betong och asfaltsträckan förbi Uppsala presenteras i Figur 4. K1 och K2 anger körfält och S och N anger riktning, (A) och (B) anger asfalt- och betongsträcka.

Det är tydligt att största spårutveckling sker i K1. Spårutvecklingen för valda sträckor är något större i norrgående riktning. Skillnaden är större mellan K1 och K2 för asfalten vilket kan förklaras av tillskott i spår från de permanenta deformationerna trots att en högkvalitativ sten (kkv6) används för asfaltbeläggningen.



Figur 4 Spårutveckling per år på E4 förbi Uppsala (Betong/Asfalt)

Figur 5 visar IRI-utvecklingen för betongvägen för K1 och K2. Ojämnheten är större för K1 vilket kan förklaras med de utvecklade hjulspåren som kan påverka IRI-värdet negativt. Det kan även noteras att överläggning med asfaltlager ger ett lägre IRI-värde.



Figur 5 IRI-utveckling på E4 förbi Uppsala (K1N/K2N, Betong)

Genom att analysera observerade nedbrytningar som tex spårdjup samt jämnhet kan prognosmodeller tas fram för att prediktera planerade underhålls- samt reparations åtgärder. Det är viktigt att beakta relevanta faktorer som påverkar tillståndsutvecklingen.

Nedan ges exempel på ett antal metoder och mätningar för att karakterisera vägytegenskaper:

- Visuell inspektion
- Bärighetsmätning (FWD, Rullande bärighetsmätning)
- Georadarmätning (GPR för att lokalisera dymlingar och tjocklek)
- Seismisk mätning (materialegenskaper)
- Ojämnhet i längsled (IRI)
- Ojämnhet i tvärlid (spårdjup)
- Lutning i längsled (backighet)
- Lutning i tvärlid (tvärfall)

- Längsprofil
- Textur
- Friktion
- Polering
- Partikelemissioner
- Digitala stillbilder
- Vägytans utseende
- Längdmätning och positionering (GPS)
- Kurvatur
- Sprickor
- Övriga mått som kan beräknas på vägprofil
- Borrkärnor för att kunna utföra olika provningar i lab, som t ex:
 - Utmattningsegenskaper
 - Styvhetsmodul/Komplexmodul
 - Deformationsegenskaper
 - Tryckhållfasthet och densitet
 - Saltfrostegenskaper
 - Kloridinträngning
 - Luftporstruktur via ett s k planslip, vilken i sin tur säger något om luftporerna storlek och fördelning i provet.
 - Vct och eventuella skademekanismer via ett s k tunnslip

Genom att följa tillståndsutvecklingen över flera år kan nya oväntade effekter identifieras och beaktas (ex. förändrad trafik, klimateffekter, material etcetera). Denna kunskap kan användas till att öka förståelsen av underliggande faktorer som påverkar överbyggnadens nedbrytning samt observerade skador för att bättre kunna välja hållbara underhåll- och reparationsåtgärder. Det är även viktigt att sätta in åtgärder vid rätt tidpunkt för att optimera kostnader.

Tabell 1 ger en sammanställning av inspektioner/utvärderingar som utförs i England och USA.

3. Sammanställning av underhålls- och reparationsåtgärder

Under de senaste åren har ett antal manualer och guider uppdaterats och publicerats med erfarenheter och ”best practice” avseende underhåll- och reparation av betongöverbyggnader.

Nedan ges en sammanställning av underhålls- och reparationsåtgärder baserade på följande manualer och guider.

- Handbok – Drift, underhåll och reparation av betongvägar, VTI, 2014 [1]
- Concrete pavement preservation guide, FHWA, 2014 [2]
- Concrete pavement guide, Caltrans, 2015 [3]
- Concrete pavement maintenance manual, Highways England, 2021 [4]

Tanken är inte att nämna samtliga reparationsmetoder i detalj men att ge exempel på de vanligaste och viktigaste åtgärderna för högtrafikerade vägar.

Tabell 1. Typer av skador och möjliga underhålls- och reparationsåtgärder

Typ av skada	Möjlig skadeorsak	Underhållsåtgärd
Fogskada (fogmaterial)	- Dålig vidhäftning - Förlust av fogmaterial - Upptryckning av fogmassa - Otillräcklig elasticitet - Fel bredd på foglisten	- Omfogning med foglist - Omfogning med fogmassa
Fogskada (kanter)	- För tidig sågning - För sen sågning - Skador vid friläggning - Trafik med dubbdäck - Låsning i rörelsefog - Otillräcklig stöd under fogar - problem med dymlingar	- Ingen åtgärd (små skador) - Kantlagning (gjutning)
Fogskador (väggrensfog)	- Rörelse på grund av tjäle - Asfaltbeläggningen åldrad - Sättningar i vägrenen	- Tätas med bitumen och sand - Tätas med fogmassa - Omläggning av asfaltväggen
Vägmarkering (Vidhäftning)	- Bristfällig rengöring - Olämpligt material - Otillräcklig primning - Olämplig snöröjning - Felaktig tjocklek	Arbetsgång: 1. Borttagning gammal massa 2. Vattenfräsning 3. Primning 4. Påförande av ny massa
Låg friktion	- Undermålig mikro- & makrotextur	- Diamantslipning
Ojämnheter (sättningar)	- Deformation - Erosion av material - Otillräcklig dränering - Brist i styvhet i underbyggnad	- Lyftning av plattor - Byte av plattor, antingen via platsgjutning eller via prefab - Förbättring av dränering

	- Tjäle	
Ojämnheter (plattförskjutning)	- Erosion vid fogar	- Diamantslipning - Lyftning av plattor - Byte av plattor, antingen via platsgjutning eller via prefab
Ojämnheter (beläggningsytan)	- Ojämnt yt slitage	- Diamantslipning - Pågjutning
Pop-out (materialsläpp 10-50 mm), troligen pga olämpligt ballastmaterial	- Saltfrostavskalning - ASR - Ingjutna olämpliga material	Troligen ingen risk på kort tid, men på längre sikt kan åtgärder behövas vidtas, t ex: - Lokala reparationer - Tunna reparationer med cement- eller epoxibundet material
Hjulspår	- Dubbslitage - Undermåligt stenmaterial (lågt prall- / kulkvarnsvärde)	- Diamantslipning - Pågjutning
Yskador/ytavskalning	- Saltfrostavskalning - Icke korrekt finish och härdning vid produktion - Otillräckligt cementinnehåll / för högt vct t ex pga. vid produktion el. vid nederbörd - Otillräckligt luftinnehåll/ dålig luftporstruktur/ansamling av luftporer - Bränsle eller annan kemisk påverkan	- Återställning av textur - Tunn pågjutning - Djupare reparation - Reparation av hela tvärsnittet - Sektionsbyte - Pågjutning eller ombyggnad. Antingen med fräslåda eller med en fräsning med efterföljande pågjutning av asfalt (PMB) eller betong.
Ytskador/ythåligheter	- Stor uppsprickning - För lågt täckskikt - Konstruktionens livslängd överskriden	- Reparation över hela tjockleken/byte av tvärsnitt/sektion
Kompressionsskador	- Yttre påverkan av till exempel temperatur eventuellt i kombination med för litet avstånd i fogar - Konstruktionsfel	- Troligen krävs både reparation av hela tvärsnittet samt åtgärdande av underliggande material.

	- Tvång i fog - Otillräcklig vibrering av betong, otillräcklig vidhäftning mellan betonglager	
Oregelbundna sprickor	- Otillräcklig härdning, eller uttorkning mellan pallar vid gjutning/produktion - Uttorkad betong eller separerad betong - Alkalisilikareaktioner (ASR)	- Ytbehandling - Cement- eller epoxiinjektering - Ta bort skadad sektion och gjuts om (ASR)
Sprickor (längsgående)	- För sen fogsågning - Trafik för nära betongkant - Underdimensionerad - Fel läge på dymlingar - Sättningar	- Tätning av spricka - Förankring av spricka - Tunn pågjutning (armering) - Omgjutning av plattor
Sprickor (tvärgående)	- För sen fogsågning - underdimensionerad - Sättningar	- Tätning av spricka - Förankring av spricka - Tunn pågjutning (armering) - Omgjutning av platta
Sprickor (hörn)	- Trafik för nära betongkant - Underdimensionerad - Erosion av material	- Tätning av spricka - Förankring av spricka - Omgjutning av platta
Längsgående sprickor	- Bristfällig underbyggnad - Trafikbelastningar - Felkonstruktion - Utförande fel - Tvång i fogar	- Sprickreparation och tätning - Sektionsbyte - Djupare reparation och eventuellt byte/förstärkning av underbyggnad
Sprickor (blocksprickor)	- Underdimensionerad - Erosion av material - Livslängden är slut	- Omgjutning av plattor
Sprickor (vid dymlingar)	- Dymlingar är fel placerade - Instabila betongplattor - Felkonstruktion	- Ersätts med nya dymlingar - Underlaget stabiliseras
Många plattor	- Livslängden är slut	- Omgjutning av körfält

med sprickor		
Erosion av finmaterial (pumpning)	- Otäta fogar - Instängt vatten - Bristfällig dränering - Tätning av fogar	- Tätning av fogar - Stabilisering av plattor - Dränering

Sammanställningen indikerar på att det internationellt finns ett antal inarbetade och beprövade reparationsmetoder som potentiellt skulle kunna implementeras i Sverige för våra specifika förutsättningar som tex dubbdäcksslitage och tunga fordon.

Som tidigare nämnts eftersträvas effektiva och snabba underhålls- och reparationsåtgärder som minimerar trafikstörningar. Åtgärder bör om möjligt kunna utföras under natten för att trafiken skall kunna släppas på till morgonrusningen.

Exempel på snabba och effektiva åtgärder som bör kunna användas i Sverige innefattar till exempel, slipning/fräsning av betongytan samt byte av hela block med Prefabpaneler, se exempel nedan. På KTH pågår även forskning kring detta under ledning av prof. Johan Silfwerbrand.



Figur 6 Utbyte av prefabricerade betongvägsplattor [5]



Figur 7 Installation av hexagonala betongplattor [6]



Figur 8 Test av prefabricerade betongblock i Virginia och Colorado [6].

4. Studiebesök England & USA

För att studera nya och potentiella reparationsmetoder har studiebesök i England och USA genomförts. I England besöktes en teststräcka på M1 där olika metoder för att återställa ytegenskaper skall utvärderas. I USA besöktes ett projekt på väg US290 som skulle slipas enligt the Next Generation of Concrete Surfaces (NGCS) [7]. Vidare utfördes ett studiebesök hos Golden Triangle Construction, Pennsylvania, USA.

3.1 Studiebesök i England, tester på M1

Studiebesök vid utförande av provytor på M1 där fem olika åtgärder för att återställa funktionella vägytegenskaper (dvs. jämnhet, friktion, polering, textur, buller etcetera) skall undersökas. Ytan som skall återställas är en ca 40 år gammal ECP (exposed concrete pavement).

Följande åtgärder har utförts och kommer att utvärderas:

1. Longitudinell diamantslipning (LDG)
2. Finfräsning
3. Obehandlad sektion (kontrollsektion)
4. Tillämpning av ett Thin Surface Course System, 0/10, 35 mm (TSCS)
5. Tillämpning av ett Ultra-Thin Surface Course System (UTSCS), 0/6, 22 mm
6. Blästring

Sträckorna kommer att följas upp mellan september 2018 och december 2022. Vid studiebesöket utfördes slipning av en del av provsträckorna.

Resultaten förväntas att öka kunskapen om LCC/LCA kostnader etc.

Under 2021 har ytterligare en provsträcka utförts på M1 där slipning enligt NGCS skall testas.

Figur 9-12 illustrerar slipningsförsök på M1.



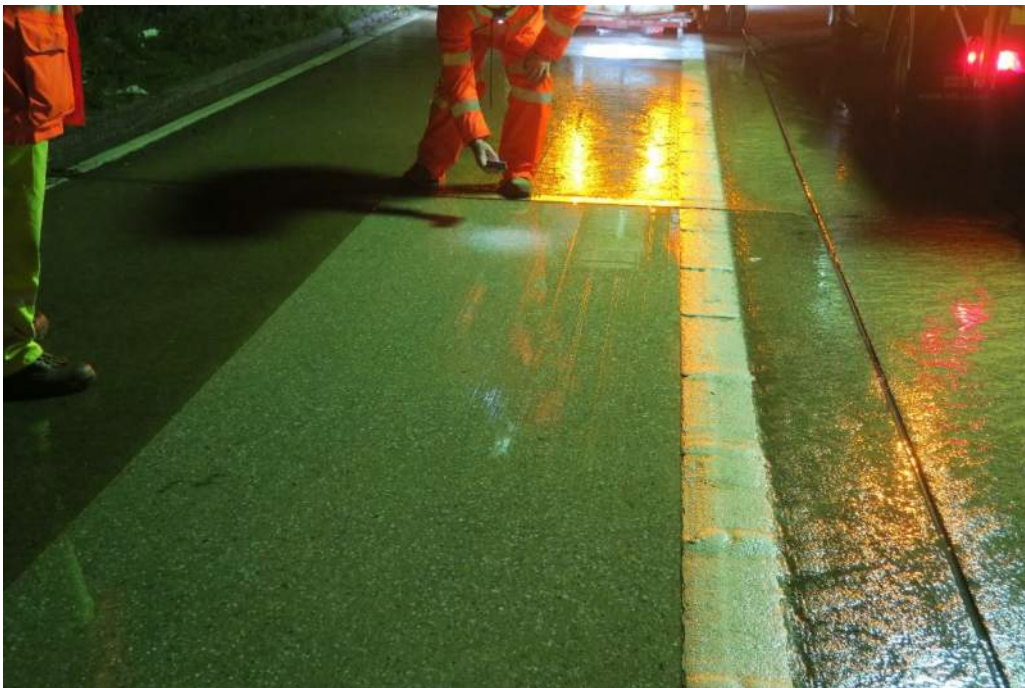
Figur 9 Studiebesök provsträcka på M1



Figur 10 Slipning del av M1



Figur 11 Resultat av slipning del av M1



Figur 12

4.1 Studiebesök i USA, slipning (NGCS) på US290 utanför Huston

För att studera slipning av betongvägar togs kontakt med The American Concrete Pavement Association (ACPA) som tog med oss på ett projekt utanför Huston där Harris County's U.S. 290 skulle slipas enligt the Next Generation of Concrete Surfaces (NGCS). NGCS är ett koncept som utvecklats av Purdu University. Syftet med NGCS var främst att minska däckbuller samt att återställa vägytans funktionella egenskaper. Försök med flera slipsteg testades för att erhålla en optimal negativ

ytttextur. Det nuvarande konceptet innefattar två slipningar. Första slipningen (planfräsning) har som uppgift att återställa ytans jämnhet samt friktion (ytråhet). Andra slipningen har som uppgift att skapa en längsgående negativ textur.

Figur 13–25 visar exempel på de olika momenten. Figur 14–16 visar exempel på de olika utrustningar som användes under slipningen. Figur 17 visar trumman med diamantsågblad som används i första steget (planfräsning). Sågbladen är ca 3 mm tjocka och sitter ca 0,9 mm avstånd mellan varandra. Figur 18 visar exempel på resultat av första slipningen. Figur 19 visar exempel på trumma som användes i andra steget. Det kan noteras att diamantsågbladen är separerade för att orsaka den negativa texturen. Tjocklek på sågbladen i andra steget är ca 2,5 mm och sitter med ett avstånd mellan 12–16 mm. Normalt är sågdjupet 3–5 mm. Figur 20 visar resultat efter första och andra slipningen. Figur 21–25 visar exempel på slutresultatet efter slipning. Bullerreduktion på några dB har uppmätts.

Slipning skulle potentiellt vara en snabb och effektiv underhållsåtgärd för att ta bort hjulspår. Slipning kan utföras under nattetid för att minimera störningar. Utveckling och optimering för svenska förutsättningar kommer sannolikt att behövas. En fråga att utreda är hur de olika slipningar klarar dubbdäckstrafik.



Figur 13



Figur 14



Figur 15



Figur 16



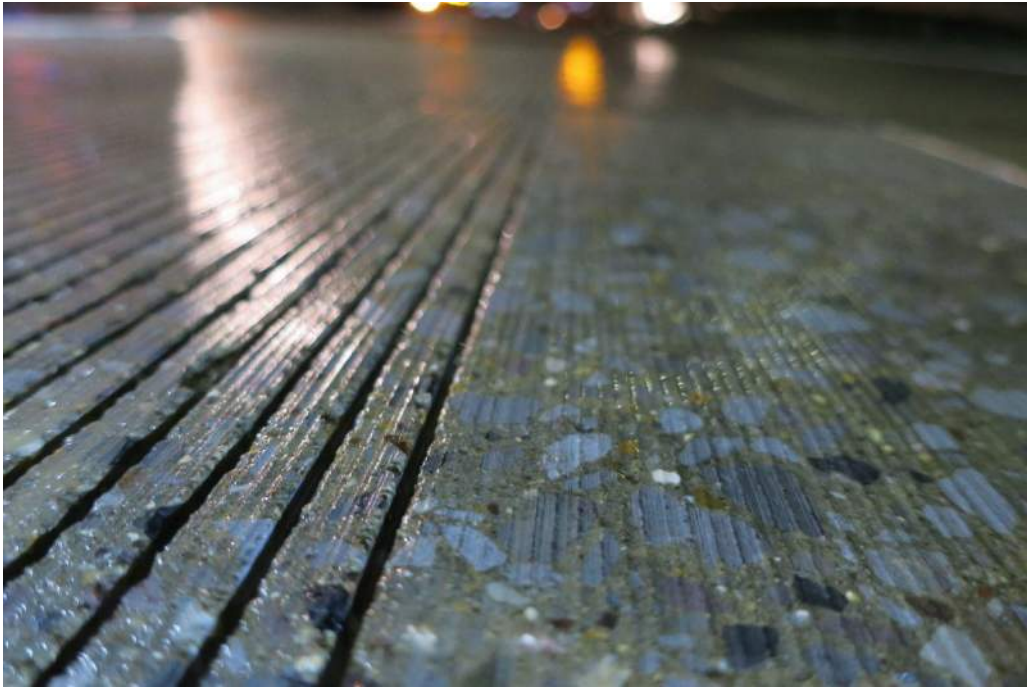
Figur 17



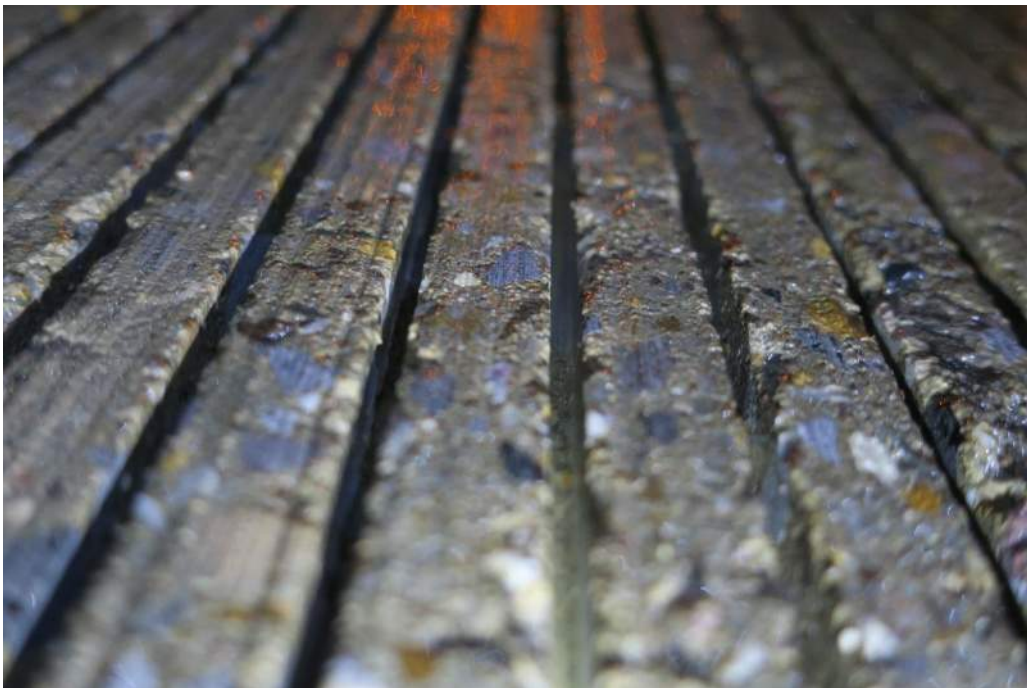
Figur 18



Figur 19



Figur 20



Figur 21



Figur 22



Figur 23



Figur 24



Figur 25

5.1 Studiebesök, Golden Triangle Construction, Pennsylvania, USA.

Under studieresan gjordes ett stopp hos det familjeägda företaget Golden Triangle Construction som är en entreprenör specialiserad på byggande av betongvägar. I detta fall handlade det om uppförande av ny väg. Enligt entreprenören krävs det ca 5000 yards (eller ca 4,6km) för att det ska vara lönsamt med tanke på de maskiner som krävs. De lägger ca 2000 yds²/dag (eller ca 1700 m²/dag) med tjocklek om ca 250 mm. De har egen mobil betongfabrik som de tar med sig till olika projekt samt egna läggare. Anledningen till egen fabrik är man vill ha bra kapacitet samt ha noggrann kvalitetskontroll på omgående material och utlagd betong. I många fall de haft leveranser har det varit problem med fabriksbetongen att den varit för lös.



Figur 26



Figur 27



Figur 28



Figur 29

5. Slutsatser

Betongvägarna utförda i Sverige fram till mitten av nittitalet har uppvisat relativt bra funktionalitet och livslängd. De senare betongvägarna har generellt inte uppvisat lika goda egenskaper vilket medfört tidigarelagda underhållsåtgärder. Eftersom underhåll och reparationsåtgärder inte funnits tillgängliga har betongvägar inte varit konkurrenskraftiga trots deras fördelar.

En orsak till detta har berott att de val och optimeringar som gjorts i samband med byggnation av betongvägar mer syftat i att kostnadsoptimera än att se till konstruktionens livslängd.

- De betongvägar som finns i Sverige har haft blandade resultat:
 - o Arlanda har visat på mycket liten spårbildning, efter 30 år behövdes ingen åtgärd. I en punkt har kraftig sprickbildning setts vilket beror på dålig undergrund och större trafik än beräknat.
 - o Sträckan Fastarp – Heberg uppvisade problem med sprickor, CG. Sprickor har injekterats och hela plattor har bytts ut.
 - o Förbifart Falkenberg har efter 20 år uppvisat endast 5mm i nötning men däremot har en del längsgående sprickor uppkommit.
 - o Eskilstuna: Beläggningen klarade då inte uppsatta jämnhetskrav i längsled (IRI), bl a pga mycket luftporer. Dessutom var det varierande stenkvalitet och en del problem med bärighet pga för tunt tvärsnitt efter fräsning.
 - o Uppsala har haft spårbildning, troligen beroende på otillräcklig slitstyrka på stenmaterialet. Det gäller framför allt i det övre slitagedelen.
- En förutsättning för att erhålla en kostnadseffektiv betongväg med lång livslängd är att följande värderas och hanteras: Erforderlig dimensionering, val av ingående material & sammansättning, rätt utförande samt lämpliga underhålls- och reparationsåtgärder i rätt tid.
- De finns idag god kunskap om hur betongvägar skall dimensioneras (konstruktion och material) samt byggas på ett hållbart sätt.
- Nya utvecklade recept optimerade för betongvägsändamål samt ökad kunskap om ingående material (som t ex stenmaterialkvalitet) förväntas öka livslängden för nya, moderna betongvägar.
- De finns goda erfarenheter om ett antal drift- och underhållsmetoder internationellt vilka potentiellt skulle kunna vidareutvecklas och optimeras för svenska förhållanden.

Det finns en stor möjlighet att verifiera ovanstående aspekter (dimensionering, materialval och receptur, utförande samt underhåll- och reparationsåtgärder) genom att anlägga och följa upp ett antal provsträckor. Med mildare vintrar minskar användningen av dubbdäck vilket kommer att göra att betongvägar gynnas med mindre slitage och underhåll.

6. Referenser

1/ VTI notat 14-2014: Hultqvist, B.-Å. & Dolk E. (2014). Handbok- Drift, underhåll och reparation av betongvägar. Linköping: Statens Väg- och Transportforskningsinstitut.

2/ Concrete pavement preservation guide, FHWA, 2014,
<https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif14004.pdf>

3/ State of California. Concrete Pavement Guide. California: Caltrans, Division of Pavement Program

4/ AECOM and Britpave (2021). Concrete Pavement Maintenance Manual. Highways England

5/ https://www.researchgate.net/figure/ModieSlab-prefabricated-concrete-pavement_fig3_237818688

6/ Precast Concrete Pavements and Results of Accelerated Traffic Load Test, Erwin Kohler, Louw du Plessis, Peter J. Smith, John Harvey, Tom Pyle (2016).

7/ The Next Generation Concrete Surface (NGCS), https://www.igga.net/wp-content/uploads/2018/08/FSFeb2015_Next_Generation_Concrete_Surface_NGCS.pdf

Bilaga F: LCA av framtagna recept

Nadia Al-Ayish, RISE

Gustav Hållenius, RISE

Åsa Laurell Lyne, RISE

2020



SAMHÄLLSBYGGNAD
INFRASTRUKTUR OCH
BETONGBYGGGANDE



Hållbara Betongvägar – Livscykelkostnadsanalys av framtagna betongrecept

Nadia Al-Ayish, Gustav Hållenius, Åsa Laurell Lyne

RISE Rapport 2020:

Hållbara Betongvägar – Livscykelkostnadsanalys av framtagna betongrecept

Nadia Al-Ayish, Gustav Hållenius, Åsa Laurell Lyne

Abstract

Sustainable concrete roads – Life cycle cost analysis of developed concrete mixes

In Sweden, there are few concrete roads with a total road length of 68 km. As there is little experience in overall, this is a challenge to be able to relate to the national sustainability goals and the transport policy goals. More examples are needed that show how to build sustainable and cost-effective. To do so, it is needed to relate quality data from concrete roads to costs in a life cycle perspective. This present study proposes a method using Life Cycle Cost Analysis (LCCA) together with lab and field data on abrasion resistance. The purpose is to identify concrete mixes for wearing course that provide the lowest cost of investment and over time.

Six different recipes, which have been developed within the project in order give the wearing course as good technical performance as possible, have been evaluated in a life cycle cost analysis based on the net present value method and ASEK. The financial items that were included in a primary analysis are owner costs and user costs. Secondly, the costs were compared against an asphalt road which also includes fuel savings.

The analysis was based on a case study that has been defined by the Swedish Transport Administration. The road consists of three lanes in two directions and is divided into a tunnel section and a "regular" road section. The superstructure is different for the road types and consists of a wear layer between 24 and 25 cm. To include the long-term effect of the choice of concrete recipes, a regression analysis was performed on rutting and wear coefficients (Prall values), measured with Prall-method, on the existing concrete roads in Sweden. Thus, Prall values that have been tested for the concrete recipes have been correlated to the number of years for maintenance (grinding).

The result shows the cost of the concrete recipes does not correlate with the cement content and Prall value, which means that there is potential to build both durable and cost-effective as well as environmentally friendly since the cement is the largest source of emissions in the concrete recipe.

In terms of owner costs, it was found that the cheapest concrete recipe gives the lowest investment cost, which is expected. While the second cheapest recipe, which has the lowest Prall value, provided the lowest maintenance costs. Overall for owner costs, the cheapest concrete gives the lowest costs. When user costs are included, the recipe with the lowest value gives the overall lowest cost. Convenience value therefore plays a crucial role in the economic sustainability of the concrete road. It is proposed that the correlation between condition and Prall value to obtain a statistically proved time-to-maintenance is further studied in future research projects.

Previous comparative LCC studies on concrete and asphalt roads usually show that the investment costs are higher for the concrete road, while the lower maintenance requirement gives a total lower life cycle cost. This study shows that investment costs are equal, with advantage to concrete, and that maintenance-related costs are significantly lower for the concrete road.

Finally, the LCC study on developed concrete recipes for wearing course indicates that it is possible to build both durable and economically and environmentally sustainable concrete roads that can also have great socio-economic savings.

Key words: Concrete roads, LCC, costs, wearing course, quality, maintenance

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2020:

ISBN:

Stockholm 2020

Innehåll

Abstract	2
Innehåll	4
Förord.....	5
Sammanfattning	6
1 Introduktion	7
1.1 Syfte och mål	8
1.2 Omfattning	8
1.3 Studerade betongrecept för slitlager	8
2 Metod.....	9
2.1 LCC	9
2.1.1 Nuvärdeskostnad	9
2.1.2 Kostnadsmodell	9
2.2 Tid till underhåll	11
2.3 Fallstudie.....	12
2.3.1 Jämförelse med asfalt – sekundär analys	12
3 Inventering av kostnader	14
3.1 Betongväg	14
3.2 Asfaltsväg	15
4 Resultat.....	16
4.1 Analys av betongrecept	16
4.2 Analys av befintliga kvalitetsdata – tid till underhåll	17
4.3 LCC av framtagna slitlager i betong	18
4.3.1 Direkta kostnader	18
4.3.2 Nuvärde.....	20
4.3.3 Känslighetsanalys av betongvägar	21
4.3.4 Jämförelse med asfalt.....	21
5 Diskussion och slutsats	23
Referenser	25
Bilagor	26
A. Betongrecept	26

Förord

Föreliggande studie av livscykelkostnaden av slitlager är en del av projektet ”Hållbara betongvägar” som delfinansierats av BVFF, SBUF och cementa. RISE fick i uppdrag att utvärdera i projektet framtagna betongrecept för slitlager med avseende på livscykelkostnader. Syftet är att identifiera faktorer hos betongen som har ett stort inflytande på kostnaderna under en ekonomisk livslängd på 50 år. Resultatet är tänkt att bidra till information om hur ett beständigt slitlager kan väljas till en låg livscykelkostnad.

Sammanfattning

I Sverige finns det få betongvägar som totalt för närvarande utgör en väglängd på 68 km. Då det finns lite erfarenhet samlad är det en utmaning att relatera till de nationella hållbarhetsmålen och de transportpolitiska målen. Det behövs fler exempel som visar hur man kan bygga hållbart och kostnadseffektivt. För att göra det behöver man relatera kvalitetsdata från betongvägar till kostnader i ett livscykelperspektiv. I föreliggande studie föreslås det en metod som använder livscykelkostnadsanalys (LCCA) tillsammans med laboratorie- och fältdata på nötningsmotstånd. Syftet är att identifiera betongrecept för slitlager som ger de lägsta kostnaderna vid investering och över tid.

Sex olika recept har tagits fram i projektet med syfte att ge slitlagret en så god teknisk prestanda som möjligt. Dessa recept har utvärderats med hjälp av en livscykelkostnadsanalys baserad på nuvärdesmetoden och ASEK. De ekonomiska poster som inkluderades i en primär analys är väghållarkostnad och vägarbetskostnad. Sekundärt jämfördes kostnaderna mot en asfaltsväg där även bränslebesparing togs med i kalkylen.

Analysen baseras på en fallstudie som har definierats av Trafikverket. Vägen består av tre körfält i två riktningar och är fördelad på en tunneldel (bergskärning) och en "vanlig" vägdel (lätt bergbank). Överbyggnaden är olika för vägtyperna och består av ett slitlager på mellan 24 och 25 cm. För att inkludera långtidseffekten av val av betongrecept har en regressionsanalys utförts på spårdjup och Prallvärden på de befintliga betongvägarna i Sverige. Således har Prallvärden som har testats på betongrecepten kunnat korreleras till antalet år till underhåll (slipning).

Resultatet visar att kostnaden för betongrecepten per kubikmeter varken korrelerar med cementhalt eller Prallvärde vilket innebär att det finns potential att bygga både beständigt och kostnadseffektivt samt även miljövänligt då cementet är den största utsläppskällan av koldioxid hos betongreceptet.

Vad gäller väghållarkostnader visade det sig att det billigaste betongreceptet ger de lägsta investeringskostnaderna, vilket är förväntat. Medan det näst billigaste receptet, som har det lägsta Prallvärdet, gav lägst underhållskostnader. Totalt för väghållarkostnader ger den billigaste betongen de lägsta kostnaderna. När vägarbetskostnader inkluderas ger receptet med lägst Prallvärde det totalt sett lägsta kostnaderna. Prallvärdet har därför en avgörande roll för betongvägens ekonomiska hållbarhet. Det föreslås att korrelationen mellan tillståndsdata och Prallvärde för att erhålla en statistiskt säkrad tid-till-underhåll studeras vidare i framtida forskningsprojekt.

Tidigare jämförande LCC-studier utfördes på betong- och asfaltsvägar visar oftast att investeringskostnaderna är högre för betongvägen medan det lägre underhållsbehovet ger totalt sett lägre livscykelkostnader. Den här studien visar att investeringskostnaderna är lika, med fördel för betong, och att underhållsrelaterade kostnader är avsevärt lägre för betongvägen.

Slutligen indikerar LCC-studien för inom projektet framtagna betongrecept för slitlager att det går att bygga både beständiga och ekonomiskt och miljömässigt hållbara betongvägar som dessutom kan ha en stor samhällsekonomisk besparing.

1 Introduktion

I Sverige finns det ett fåtal betongvägar som sammanlagt har en längd på 68 km [1]. Dessa utgör endast ca 0,4 % av Sveriges huvudvägnät. Det kan jämföras med Tyskland där hela 28 % av huvudvägnätet är betongvägar [2]. De befintliga svenska betongvägarna byggdes mellan 1990 och 2006. Det lades även ett par betongvägar på 70-talet i Skåne, men dessa har asfalterats om på grund av en kort livslängd. Huvudorsaken till att man lade nya betongvägar beror framför allt på den allt tyngre trafiken. Eftersom betongbeläggningar har en bättre bärförmåga jämfört med asfaltsbeläggningar ville man lära sig mer. Dessutom har betongen ett bättre nötningsmotstånd jämfört med asfalt [3]. Därför gjordes 1996 även några provsträckor på E6 vägen utanför Falkenberg där olika typer av väguppbyggnad och olika typer av ballast provades på vägen [4].

Tabell 1 visar var Sveriges betongvägar finns.

Tabell 1 Sveriges betongvägar [3].

Plats	Byggår	Sträckning (km)
E4.väg 65 Arlanda	1990	1,6
E6/120 Falkenberg 1	1993	15
E6/120 Falkenberg 2	1996	13
E20 Eskilstuna	1999	14
E4 Uppsala	2006	23

Då det finns få betongvägar i Sverige är erfarenheten mindre vad gäller den ekonomiska nyttan. Detta är en utmaning för att kunna relatera till de nationella hållbarhetsmålen såväl som de transportpolitiska målen. Det behövs därför flera exempel och en metod som kan relatera kvalitetsdata från betongvägar till kostnader i ett livscykelperspektiv. I den här studien föreslås det en metod som använder livscykelkostnadsanalys (LCCA) tillsammans med laboratorie- och fältdata på nötningsmotstånd.

Tidigare studier på livscykelkostnader (LCC) av betongvägar omfattar oftast en jämförelse med asfalt. Få studier har utfört en analys som påvisar hur betongvägen ska konstrueras för att få en så låg kostnad som möjligt. I en studie av Batouli et al. [5] jämfördes asfalt med betong där väghållarkostnader och andra kostnader relaterade till användarskedet, såsom interaktionen mellan vägytan och fordonet (t.ex. rullmotstånd) samt trafikstörningar på grund av underhållsarbete, undersöktes. Studien visar att asfaltsvägen gav lägre investeringskostnader, men när användarskedet inkluderas har betongvägen en lägre kostnad totalt för en skattad livslängd på 50 år. Liknande resultat har visats i andra studier [6-8]. Det indikerar att betongvägens styrka vad gäller kostnader är relaterad till kvaliteten hos slitlagret. Detta är något som kommer att tas i beaktande i den här studien.

1.1 Syfte och mål

I den här studien utvärderas de betongrecept som har tagits fram av projektgruppen med avseende på livscykelkostnader hos en vägkonstruktion. Syftet är att identifiera designstrategier som ger de lägsta kostnaderna vid investering och över tid. Sex olika recept har tagits fram för att ge slitlagret en så god teknisk prestanda som möjligt. Kostnaderna utvärderas enligt följande steg:

1. Relation mellan recept och tillhörande betongpris för att se om någon parameter ger högre kostnader.
2. Relation mellan pris för framtagna betongrecept och kvalitet för att utvärdera om en högre kvalitet ger en förändring i kostnad.
3. Användning av framtagna betongrecept som slitlager i en fallstudie för att utvärdera slitlagrets påverkan på livscykelkostnaden.
4. Jämförelse med asfalt.

1.2 Omfattning

Studien omfattar materialpriser, kostnader för underhåll, trafikstörningar och olyckskostnader. I underhållet ingår endast slipning av slitlager. Kalkylperioden för den studerade vägen är satt till 50 år i enlighet med ASEK:s rekommendation att en nybyggd väg ska ha en ekonomisk livslängd mellan 40 och 60 år [9]. Studien omfattar i första hand en jämförelse mellan olika betongrecept med tillhörande kvalitet för slitlagret. En jämförelse mellan betong och asfalt tillhör därför inte primäranalysen utan görs sekundärt i den här studien.

1.3 Studerade betongrecept för slitlager

Betongrecept för slitlagret har framtagits av projektets receptgrupp, med begränsande kriterier tillsatt luft för saltfrostbeständighet och Prallvärden (under 20, max 22). Andra utvärderingskriterier som också beaktats är bland annat produktionsmässighet, arbetbarhet, cementshalt (även relaterat till klimatpåverkan). De sju recepten redovisas översiktligt i Tabell 2. En utförlig receptsammanställning redovisas i Bilaga A. I den här studien utvärderas dessa recept genom en LCC analys med hänsyn på kvalitet.

Tabell 2 Översiktlig redovisning av studerade betongrecept.

	5C	4H-2L	5H-2L	5F-3L	5F-4L	5N	5O
Anl FA [kg]	400	390	390	390	380	370	380
Vct	0,37	0,33	0,37	0,33	0,35	0,38	0,38
Prallvärde	21,1	22	18,9	19,1	16,9	26,4	22,8

2 Metod

2.1 LCC

2.1.1 Nuvärdeskostnad

Livscykelkostnadsanalys (LCCA) är en systematisk metod som grundar sig på vedertagna ekonomiska principer och används för att utvärdera långsiktiga effekter av en investering. Syftet kan vara att utvärdera lönsamheten av olika designalternativ för ett material, som i den här studien, eller för att jämföra olika material (exempelvis asfalt och betong). Det bör noteras att vid jämförande LCCA är det inte de absoluta livscykelkostnaderna som är intressanta utan det är den relativa jämförelsen mellan olika alternativ.

Livscykelkostnaderna beräknas genom en nuvärdesanalys som tar hänsyn till dagens värde av framtida kostnader. Framtida kassaflöden diskonteras genom en kalkylräntesats. De kostnader som inte har diskonterats till dagens värde kallas i den här studien för direkta kostnader.

Nuvärdeskalkylen beskrivs matematiskt genom följande ekvation (ekv. 1) [10]:

$$Nuvärdeskostnad = \sum_{n=1}^p \frac{C_n}{(1+d)^n} \quad (\text{ekv. 1})$$

Där:

C är kostnaden vid år n;

d är diskonteringsräntan;

n antal år som beloppet ska diskonteras;

p är kalkylperioden.

2.1.2 Kostnadsmodell

LCC modellen är uppdelad utefter vem som betalar för kostnaderna. Tabell 3 visar uppdelning samt vad som inkluderas i dessa.

Tabell 3 Kostnadsposter som har tagits med i LCC analysen.

Väghållarkostnad	Trafikantkostnader	Samhällskostnader (sekundär analys)
- Investering av material för hela väguppbyggnaden - Underhåll/spårslipning	- Trafikstörningar pga omledning av trafik vid underhåll. - Olyckor pga trafikstörningar	Bensinbesparing pga slitlagret

Avvecklingskostnader och återinvestering ingår inte i analysen. Återinvestering kan antas kosta lika mycket som en nyinvestering.

Kalkylperioden i analysen har bestämts till 50 år i enlighet med ASEK:s rekommendationer [9]. Det bör även noteras att den ekonomiska livslängden inte nödvändigtvis är densamma som den tekniska livslängden. Den ekonomiska livslängden är oftast kortare än den tekniska. Att den ekonomiska livslängden oftare är kortare kan delvis bero på osäkerheter i framtiden samt att de kostnader som sker långt fram i tiden får ett mindre värde när de diskonteras.

Diskonteringsräntan har valts enligt ASEK:s rekommendationer för en samhällsekonomisk analys, vilket är ett värde på 3,5 %. Vilken diskonteringsränta som används har stor betydelse för resultatet och därför görs ofta i LCCA en känslighetsanalys där räntan varieras. Ju högre ränta desto mer viktig blir investeringskostnaderna medan en lägre ränta gynnar en dyrare investering med längre livslängd.

För att erhålla trafikantkostnaderna har en trafikmodell i enlighet med Trafikverkets rekommendationer använts.

Den information som har använts för att räkna på livscykelkostnaderna för olika slitlager i betong är:

- **Funktionsdata** – underhållsintervall, funktionskrav på ingående delar som nötningsresistens.
- **Tillståndsdata** – historiska data över spårdjup för olika betongvägar.
- **Objektdata** – Antal körfält, vägtyp, väguppbyggnad.
- **Brukardata** – ÅDT, andel tunga fordon.
- **Kostnadsdata** – kostnader för material, slipning och trafik.

Mer information är redovisat i sektion 2.2 och 2.3 samt kapitel 3.

2.2 Tid till underhåll

För att räkna ut tid till underhåll har tillståndsdata från befintliga betongvägar använts. Syftet är att ta fram ett enkelt samband mellan materialegenskap och slitagedata som kan användas till att prediktera tid till underhåll för de framtagna betongrecepten. Analysen har baserats på material och slitagedata (spår djup).

Indata för prediktering kommer från kärnor som har borrats från slitlagren och testats för tryckhållfasthet och Prallvärden, Kulkvarnsvärden har samlats in från byggrapporter och upphandlingsdokument, spår djup har mätts av VTI och tillsammans med andra slitageparametrar använts för att beräkna det justerade slitagevärdet [3].

Arlanda slipades efter 25 år. Då var det totala spår djupet = spår totalt Arlanda. Om man gör följande antaganden att

1. slitage är jämnt fördelat över åren för respektive betongväg,
2. man slipar övriga betongvägar när deras spår djup (eller justerat slitage) är lika Arlandas efter 25 år,
3. antal år till underhåll betongväg $X = [\text{spår totalt Arlanda}] / [\text{spår/år betongväg } X]$

Det är då möjligt att få fram jämförande värden för antal år till underhåll för respektive betongväg. I Tabell 4 nedan ser man då att estimerad tid till underhåll är 55,8 år för Falkenberg S och 15,1 år för Uppsala.

Tabell 4 Antal år till samma spår djup som för Arlanda efter 25 år, dvs. antal år till underhåll.

Betongväg	Antal år till underhåll
Arlanda	25,0
Falkenberg N	46,6
Falkenberg S	55,8
Eskilstuna	17,3
Uppsala	15,1

På liknande sätt kan man använda det justerade slitagevärdet för Arlanda efter 25 år för att beräkna antal år till underhåll för respektive betongvägssträcka. Antagandet är att alla betongvägssträckor underhålls när de slitits ned till samma justerade slitagevärde som Arlandasträckan efter 25 år. Antal år till underhåll är då 34,5 år för Falkenberg och 13,8 år för Uppsala, se Tabell 5.

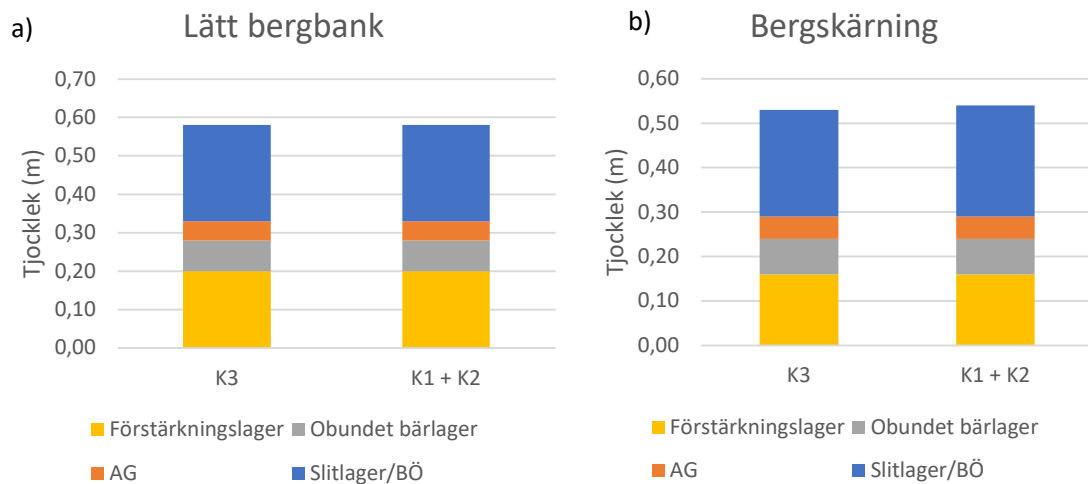
Tabell 5 Antal år till samma justerade slitage som för Arlanda efter 25 år, dvs. antal år till underhåll.

Betongväg	Antal år till underhåll
Arlanda	25,0
Falkenberg N	27,1
Falkenberg S	34,5
Eskilstuna	11,0
Uppsala	13,8

2.3 Fallstudie

Fallstudien där de framtagna betongrecepten för slitlagret är applicerad på är en högtrafikerad väg i klimatzon 2. Vägen är 20 km långt med 3 körfält (K1-K3) i två riktningar för två vägtyper; 10 km i bergskärning (tunneldel) och 10 km i lätt bergbank (utanför tunnel). Årsdygnstrafiken (ÅDT) är 120 000 fordon/dygn varav 8% utgörs av tunga fordon.

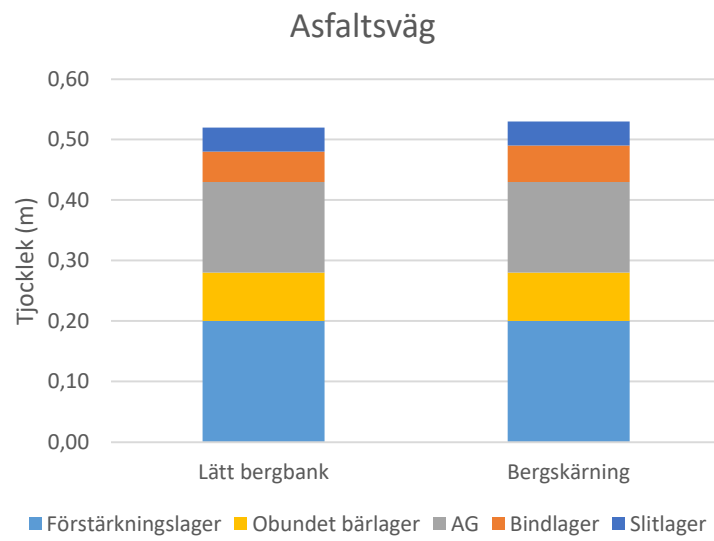
Körfälten är 3 x 3,5 m breda och är uppbyggda enligt Figur 1. K3 utgörs av en 25 cm tjock betongöverbyggnad (BÖ) för lätt bergbank medan för bergskärning är BÖ 24 cm. För körfält K1 och K2 är slitlagret 25 cm för båda vägtyperna. I övrigt består vägen av ett förstärkningslager, obundet bärlager samt asfaltsgrus (AG).



Figur 1 a) Uppbyggnad K3 och K1+K2 vid lätt bergbank. b) Uppbyggnad K3 och K1+K2 vid bergskärning.

2.3.1 Jämförelse med asfalt – sekundär analys

Asfaltsvägen är baserad på samma vägsträcka och förutsättningar som för betongvägen. Uppbyggnaden är enligt Figur 2. Den består av ett förstärkningslager, obundet bärlager, asfaltsgrus och slitlager. Till skillnad från betongvägen finns det ingen skillnad i väguppbyggnad mellan körfälten.



Figur 2 Uppbyggnad av asfaltsvägen för lätt bergbank och bergskärning.

3 Inventering av kostnader

En inventering av kostnader har utförts för investering, underhåll, trafik och olyckor.

3.1 Betongväg

Investering (väghållarkostnad)

Kostnaden för betongen enligt recepten framtagna av projektgruppen har uppskattats av Cementa. I Tabell 6 redovisas kostnaden i kr/m³ för de olika betongrecepten. Receptet med lägst kostnad är 5O medan den med högst kostnad är 5H-2L.

Tabell 6 Kostnader för de olika recepten.

Betongrecept	5C	4H-2L	5F-3L	5F-4L	5H-2L	5N	5O
Kr/m ³	980	1028	1002	976	1032	1005	963

Övriga investeringskostnader är enligt följande:

Både lätt bergbank och bergskärning

AG:	1330 kr/m ³
Obundet bärlager:	410 kr/m ³
Förstärkningslager:	406 kr/m ³

Lätt bergbank

Utläggning betong:	30 kr/m ²
Armeringsjärn:	15 kr/m ²
Arbete armering:	15 kr/m ²
Slipning/Friläggning:	50 kr/m ²
Totalt:	110 kr/m ²

Bergskärning

Utläggning betong:	55 kr/m ²
Armeringsjärn:	3 kr/m ²
Friläggning:	21 kr/m ²
Fogar/profiler:	15 kr/m ²
Totalt:	94 kr/m ²

Underhåll (väghållarkostnad)

Kostnaden för spårslipning är uppskattad till 65 kr/m³ för samtliga körfältstyper i fallet lätt bergbank. För samma åtgärd är kostnaden för körfälten bergskärning 55 kr/m³.

Trafik och olyckor (vägarbetskostnad)

Total kostnad för avstängning vid underhåll har bestämts till 30 000 kr/dag. Olyckskostnader vid avstängning/vägarbete har bestämts till 900 000 kr. För att underhålla vägen räknas det med att den behöver stängas av i 18 dagar för K1 och K2 och 12 dagar för K3 i bergskärning. För lätt bergbank stängs K1 och K2 av i 18 dagar medan K3 stängs av i 9 dagar.

Olyckskostnaderna är baserade på totalt antal fordon som kör i en sträcka i båda riktningarna, totalt antal dagar som trafiken stängs av enligt modell av Trafikverket. Detta ger en kostnad på 216 000 kr/dygn.

3.2 Asfaltsväg

Investering (väghållarkostnad)

Följande kostnader i Tabell 7 är inkluderade i beräkningen av investeringskostnaderna för asfaltsvägen:

Tabell 7 Materialkostnader för asfaltsvägen.

Material	Kostnad (kr/m ³)
Slitlager, (ABS)	2000
Bindlager	1350
AG	1330
Obundet bärlager	410
Förstärkningslager	406

Underhåll (väghållarkostnad)

Underhållskostnaden för asfaltsvägen har uppskattats av Trafikverket till 91 kr/m² för bergskärning och 97 kr/m² för lätt bergbank. Underhållsintervallen är uppskattade enligt Trafikverket enligt följande:

K1+K2: år 10, 20, 28, 40

K3: år 10, 22, 40

Underhåll av bindlager sker år 40 och är uppskattad till 80 kr/m² respektive 171 kr/m² för K1+K2 respektive K3 i bergskärning och 95 kr/m² för K1+K2 i lätt bergbank.

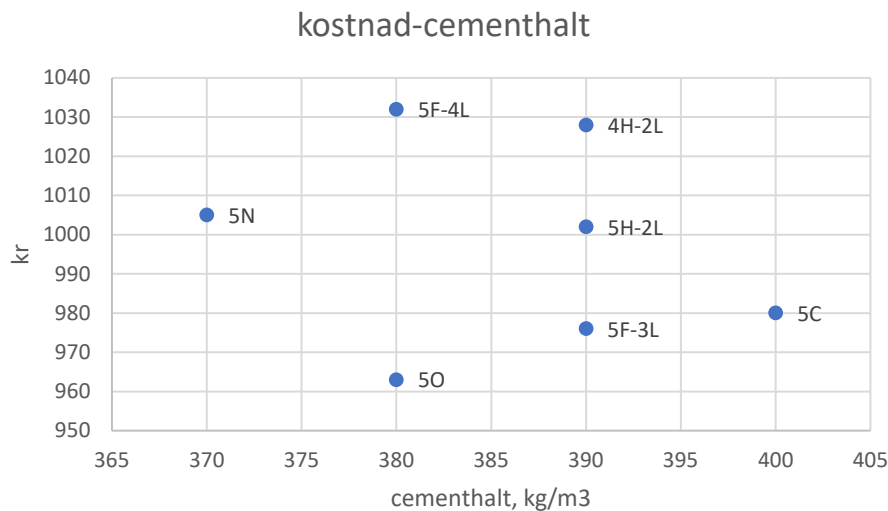
Trafik och olyckor (vägarbetskostnad)

Samma kostnader som för betongvägen men med 16 dagars avstängning.

4 Resultat

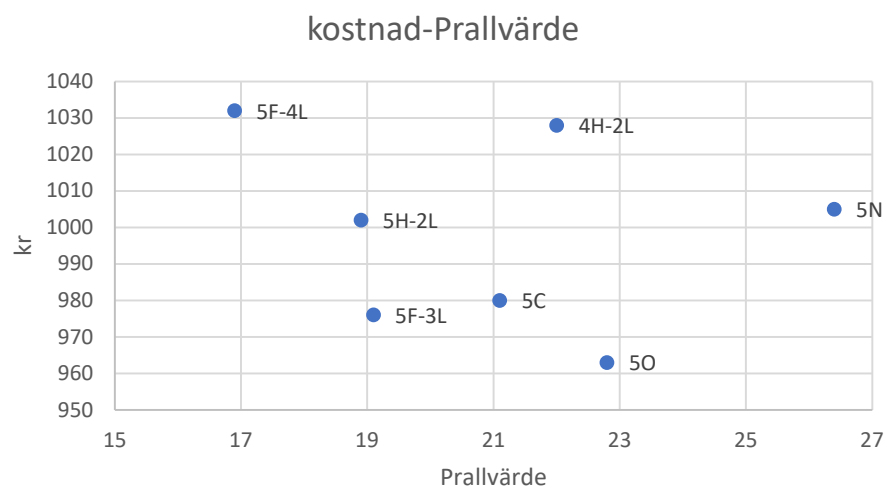
4.1 Analys av betongrecept

Resultatet för de framtagna betongrecepten visar att det inte finns något samband mellan cementmängden och kostnad att ta fram betongen (Figur 3). Vanligtvis är betongpriset för byggnader direkt korrelerat till cementhalten eller indirekt, vct.



Figur 3 Betongpriset i förhållande till cementhalten.

Ur miljösynpunkt ger en betong med lägre cementklinkerhalt ett lägre utsläpp av växthusgaser. Det innebär att en miljövänlig betong även skulle kunna ha ett lågt pris. Men för att visa det behöver hela livscykeln beaktas. Här spelar kvalitet in. För att undersöka om kvalitet har sitt pris, relaterades även kostnaderna till undersökta Prallvärdet (Figur 4). Inte heller här syntes ett samband. Generellt är silika och tillsatsmedel dyra material och en liten ökning av dessa kan ge en märkbar skillnad i pris.



Figur 4 Betongpriset i förhållande till Prallvärdet.

4.2 Analys av befintliga kvalitetsdata – tid till underhåll

Regressionsanalys kan användas för att prediktera tid (dvs år) till underhåll som baseras på material- och slitagedata. Tanken med regressionsanalysen är att finna ett enkelt samband för att beskriva eller förklara observerad variation i y-data (slitage) med hjälp av motsvarande x-data (materialdata). I den här studien har vi valt att göra det med ett linjärt funktionssamband som är ett förenklat sätt att leta efter samband mellan variabler. Det högst förväntade $R^2 = 0,867$ observerades mellan justerat slitage och Prall. Sambandet mellan 'Antal år till samma justerade slitage som för Arlanda efter 25 år (eller underhåll)'

$$= - 0,8488 * \text{Prall} + 45,825.$$

Utifrån ett givet värde på Prall för en betongkvalité är det då möjligt att estimerar "Antal år till samma justerade slitage (eller underhåll) som för Arlanda efter 25 år". I Tabell 8 har antal år till underhåll beräknats på uppmätta Prallvärden för betong där recepten har tagits fram av receptgruppen inom projektet "Hållbara betongvägar". Predikterat antal år till underhåll för de framtagna betongkvalitéerna varierar mellan 26 och 31 år.

Tabell 8 Antal år till samma justerade slitage som för Arlanda efter 25 år, dvs. antal år till underhåll beräknade på uppmätta Prallvärden.

Prov	Prall (cm ³)	Antal år till samma justerade slitage som för Arlanda efter 25 år (Y = - 0.8488x + 45,825)
5C	21,1	28
4H-2L	22,0	27
5H-2L	18,9	30
5F-3L	19,1	30
5F-4L	16,9	31
5N	26,4	23
5O	22,8	26

4.3LCC av framtagna slitlager i betong

4.3.1 Direkta kostnader

Investering

Summan av alla investeringskostnader för lätt bergbank respektive bergskärning för körfält K1 och K2 samt K3 redovisas i Tabell 9-Tabell 12. Kostnaderna redovisas i kr per kvadratmeter vägyta. Ur tabellen framgår det att slitlagret har den största andelen av kostnaden samt att det skiljer sig 3 % mellan högsta (4H-2L och 5H-2L) och lägsta (5O) värde för betongrecepten för båda vägtyperna.

Tabell 9 Investeringskostnader för lätt bergbank, K3.

	5C (kr/m ²)	4H-2L (kr/m ²)	5H-2L (kr/m ²)	5F-3L (kr/m ²)	5F-4L (kr/m ²)	5N (kr/m ²)	5O (kr/m ²)
Slitlager	249	262	263	255	248	256	245
AG	91	91	91	91	91	91	91
Obundet bärlager	34	34	34	34	34	34	34
Förstärkningslager	87	87	87	87	87	87	87
Övrigt	110	110	110	110	110	110	110
Totalt	571	584	585	577	570	578	567

Tabell 10 Investeringskostnader för lätt bergbank, K1+K2.

	5C (kr/m ²)	4H-2L (kr/m ²)	5H-2L (kr/m ²)	5F-3L (kr/m ²)	5F-4L (kr/m ²)	5N (kr/m ²)	5O (kr/m ²)
Slitlager	247	259	260	253	246	253	243
AG	89	89	89	89	89	89	89
Obundet bärlager	34	34	34	34	34	34	34
Förstärkningslager	84	84	84	84	84	84	84
Övrigt	110	110	110	110	110	110	110
Totalt	564	576	577	570	563	570	560

Tabell 11 Investeringskostnader för bergskärning, K3.

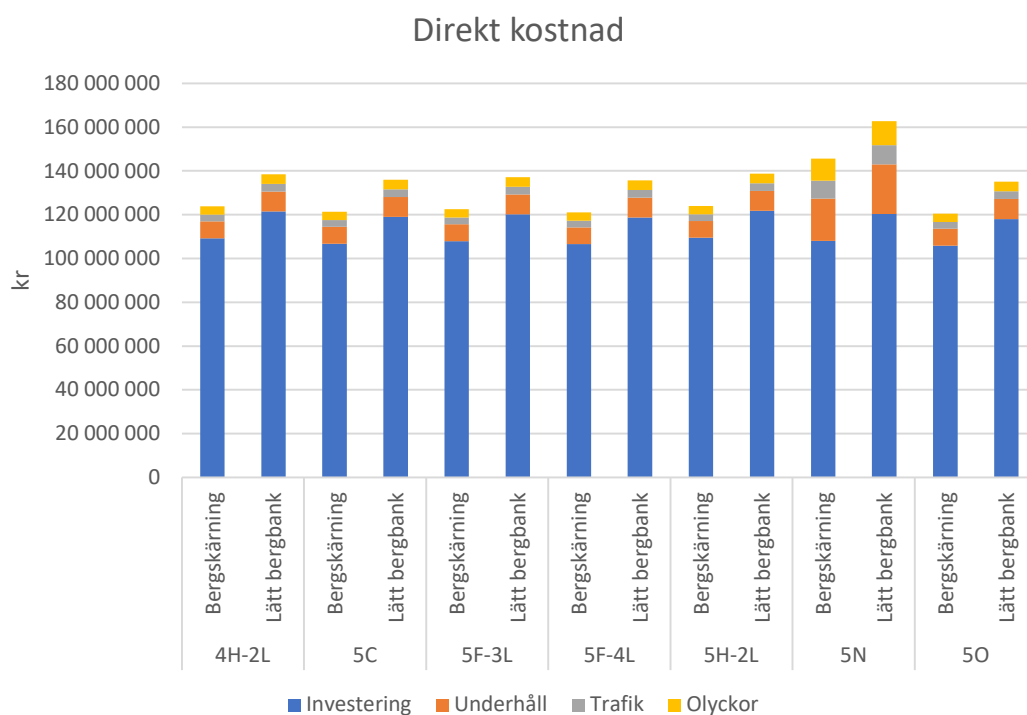
	5C (kr/m ²)	4H-2L (kr/m ²)	5H-2L (kr/m ²)	5F-3L (kr/m ²)	5F-4L (kr/m ²)	5N (kr/m ²)	5O (kr/m ²)
Slitlager	239	251	252	245	238	245	235
AG	69	69	69	69	69	69	69
Obundet bärlager	34	34	34	34	34	34	34
Förstärkningslager	69	69	69	69	69	69	69
Övrigt	94	94	94	94	94	94	94
Totalt	506	517	518	511	505	512	502

Tabell 12 Investeringskostnader för bergskärning, K1+K2.

	5C (kr/m ²)	4H-2L (kr/m ²)	5H-2L (kr/m ²)	5F-3L (kr/m ²)	5F-4L (kr/m ²)	5N (kr/m ²)	5O (kr/m ²)
Slitlager	247	259	260	253	246	253	243
AG	68	68	68	68	68	68	68
Obundet bärlager	34	34	34	34	34	34	34
Förstärkningslager	67	67	67	67	67	67	67
Övrigt	94	94	94	94	94	94	94
Totalt	510	522	523	515	509	516	505

Väghållar- och vägarbetskostnader

De direkta kostnaderna för både väghållning och vägarbete redovisas i Figur 5. Recept 5N har de största kostnaderna totalt för både bergskärning och lätt bergbank. Anledningen är att 5N har ett högre Prallvärde som indikerar att slitlagret kommer behöva slipas en gång mer än övriga recept under en kalkylperiod på 50 år.

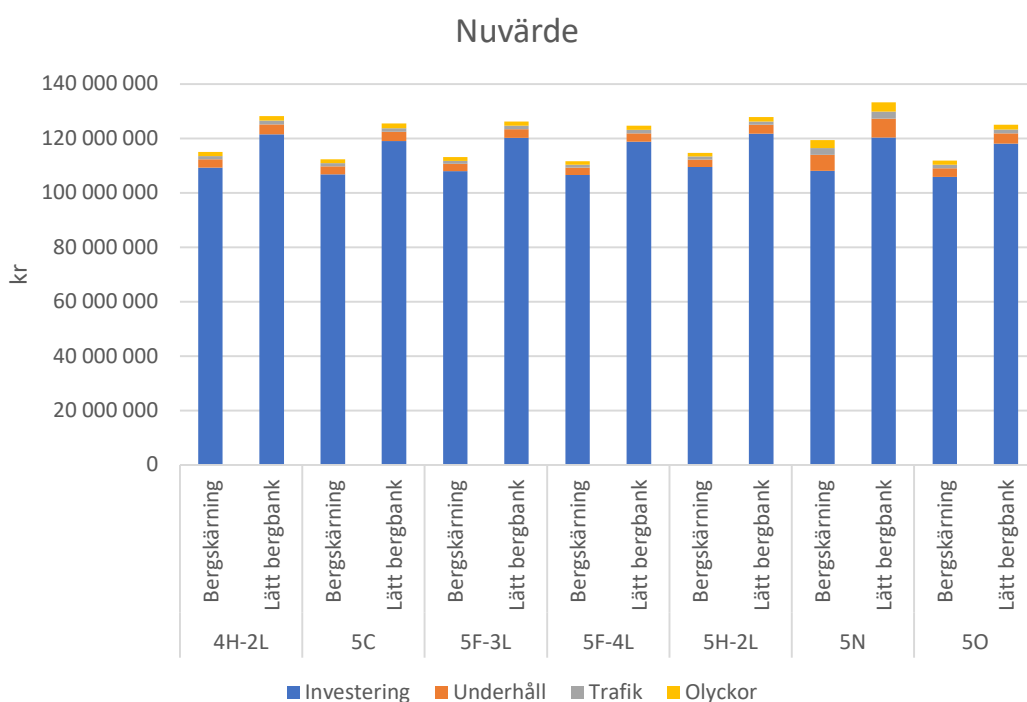


Figur 5 Vägtypernas inv.- underhålls- trafik- och olyckskostnad (direkt kostnad) för de olika recepten.

4.3.2 Nuvärde

När framtida kostnader diskonteras till ett nuvärde minskar skillnaden mellan betongrecepten (Figur 6). Det framgår i resultatet att investeringskostnaderna utgör den absolut största delen av livscykelkostnaderna. De framtagna recepten håller dessutom en god kvalitet vilket gör att underhållskostnaderna hålls minimala. När en nuvärdeskalkyl utförs spelar det en stor roll när i tiden en kostnad sker. Ju tidigare underhållet görs desto högre blir den kostnadsdelen. Den minskar exponentiellt med tiden enligt ekvation 1.

Recept 5N, som inte är det dyraste receptet, visade sig ge de högsta livscykelkostnaderna. Detta är på grund av kortare underhållsintervall.



Figur 6 Vägtypernas inv.- underhålls- trafik- och olyckskostnad (nuvärde) för de olika recepten.

Skillnaden i LCC mellan de olika betongrecepten är ganska liten. Mest påtaglig är 5N, som tidigare nämnts, på grund av kortare underhållsintervall. Tabell 13 visar totala (summan av bergskärning och lätt bergbank) väghållarkostnader samt vägarbetskostnader, i SEK, för de olika recepten. Där framgår det att betong 5F-4L har den lägsta livscykelkostnaden. Detta är på grund av de låga underhållskostnaderna. Betong 5O har lägst investeringskostnad och väghållarkostnader, men om man även tar i beaktande vägarbetskostnader så tjänar samhället mer på lösningar med lågt underhåll, trots något högre investeringskostnad.

Tabell 13 Nuvärdeskostnader summerade för de 6 betongrecepten. Lägsta kostnader är färgmarkerade.

Recept	Väghållarkostnader			Vägarbetskostnader			Summa
	Investering	Underhåll	Summa	Trafik	Olyckor	Summa	
Betong 4H-2L	230 783 620	6 636 206	237 419 826	2 586 507	3 235 150	5 821 658	243 241 483
Betong 5C	225 718 396	6 411 793	232 130 189	2 499 041	3 125 749	5 624 790	237 754 979
Betong 5F-3L	228 039 957	5 985 477	234 025 434	2 332 881	2 917 920	5 250 802	239 276 236
Betong 5F-4L	225 296 294	5 783 070	231 079 364	2 253 992	2 819 247	5 073 238	236 152 602
Betong 5H-2L	231 205 722	5 985 477	237 191 199	2 332 881	2 917 920	5 250 802	242 442 001
Betong 5N	228 356 534	12 792 989	241 149 522	5 091 030	6 366 027	11 457 057	252 606 580
Betong 5O	223 924 463	6 868 473	230 792 935	2 677 035	3 348 381	6 025 416	236 818 351

4.3.3 Känslighetsanalys av betongvägar

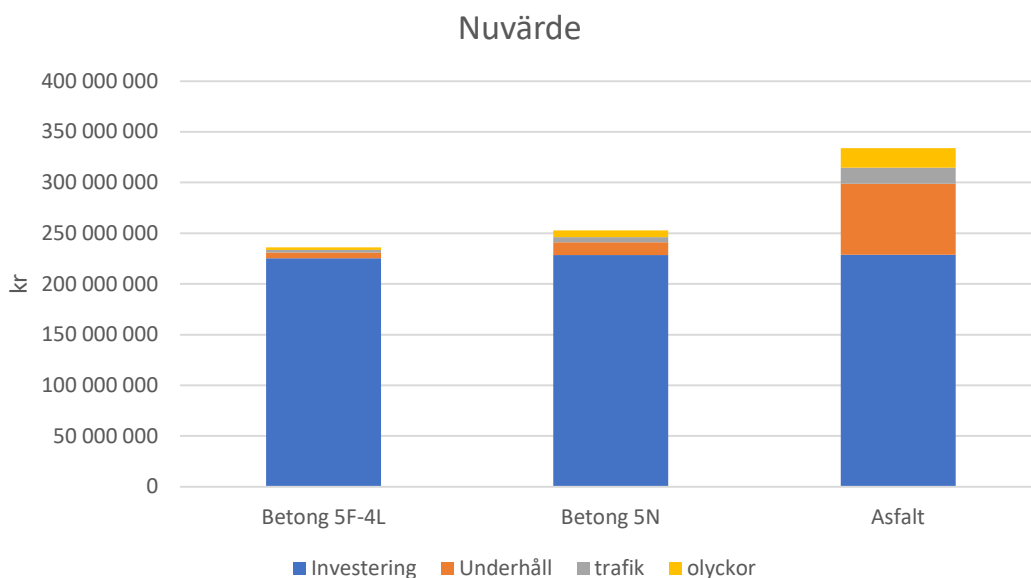
En känslighetsanalys har utförts för att undersöka räntans inverkan på den totala livscykelkostnaden. Syftet är att se om en högre ränta ger en fördel för betongrecept 5O som har låga väghållarkostnader. En ränta på 2% jämfördes med en ränta på 5%. Resultatet visar att betong 5F-4L fortfarande har de lägsta totala kostnaderna och slutsatsen är oförändrad (se Tabell 14).

Tabell 14 Känslighetsanalys av nuvärdeskostnaden där räntan varieras från 2% till 5%. Lägsta kostnader är färgmarkerade.

Recept	Väghållarkostnader		Vägarbetskostnader		Summa	
	2 % ränta	5 % ränta	2 % ränta	5 % ränta	2 % ränta	5 % ränta
Betong 4H-2L	240 626 102	235 283 472	8 634 386	3 947 526	249 260 488	239 230 998
Betong 5C	235 367 888	230 003 969	8 465 084	3 759 549	243 832 973	233 763 518
Betong 5F-3L	237 314 748	231 927 098	8 136 375	3 410 022	245 451 123	235 337 120
Betong 5F-4L	234 389 226	228 998 333	7 976 838	3 247 640	242 366 064	232 245 973
Betong 5H-2L	240 480 513	235 092 863	8 136 375	3 410 022	248 616 888	238 502 885
Betong 5N	249 144 627	236 497 248	18 695 122	7 262 378	267 839 749	243 759 626
Betong 5O	233 963 794	228 649 307	10 328 224	4 144 903	244 292 018	232 794 209

4.3.4 Jämförelse med asfalt

Asfaltsvägen har jämförts med betongvägen med lägsta respektive högsta livscykelkostnader (5F-4L och 5N). Investeringskostnaden ligger på ungefär samma nivå som för betong 5N (Figur 7). Däremot har den kortare underhållsintervall som startar vid år 10 vilket gör att den totala nuvärdeskostnaden blir högre. Det bör dock noteras att underhållsintervallen för betong respektive asfalt är baserade på olika antaganden. Betongen är baserad på labbdata som har analyserats med hjälp av fältstudier medan asfalten är baserad på erfarenhet.



Figur 7 Nuvärdeskostnad för betongvägen med den lägsta och största värden i jämförelse med en asfaltväg.

4.3.4.1 Bränslebesparing

Enligt EUPAVE [8] kan en väg med en betongyta istället för asfalt ge en bränslebesparing på 2,35 % i medelvärde. VTI visar liknande siffror i en senare studie [11] för betongvägen vid Uppsala. De kom fram till att för personbilar är bränslebesparingen 1,1% medan för tunga lastbilar ligger den på 5 % i medelvärde. Den lägre bränsleförbrukningen förklarades bero på lägre rullmotstånd jämfört med asfaltbeläggningen.

För att räkna ut bränslebesparingen användes 2019 årsmedelpris för bensin (blyfri 95) 5,97 kr/l produkt och marginal. För diesel motsvarade det 8,21 kr/l [12]. Hur mycket bränsle som går åt för tunga lastbilar respektive personbilar är hämtat ur [11].

Applicerat på fallstudien som har en sträcka på 20 km ger det en bränslebesparing på ca 17 miljoner kr per år. Räknat på en kalkylperiod på 50 år blir nuvärdet av detta 410 miljoner kr. Men detta är grundat sig på ett konstant bränslepris enligt ovan samt en konstant ÅDT.

5 Diskussion och slutsats

En livscykelkostnadsanalys har utförts på framtagna betongrecept av projektgruppen i syfte att finna designparametrar som kan ge lägre kostnader. Analysen utfördes med en nuvärdesmetod och modell enligt ASEK.

Resultatet visade att det i det aktuella fallet inte finns något samband mellan cementhalt eller Prallvärde och betongpris. Cementhalten är en viktig parameter vad gäller utsläpp av klimatgaser. Att det inte finns något samband mellan den och kostnader innebär att det går att bygga både miljömässigt hållbart och billigt. Prallvärdet ger en indikation på kvalitén och om vägen kommer att behöva slipas med längre eller kortare mellanrum. Att det inte finns något samband här ger även en indikation på att det finns potential att bygga både beständigt och kostnadseffektivt.

När väghållarkostnaderna, investering och underhåll, analyserades visade det sig att betong 5O har både den lägsta investeringskostnaden och totala kostnaden. Medan betong 5F-4L gav den lägsta underhållskostnaden. Dessa är de två billigaste betongrecepten. 5O har ett Prallvärde på 22,8 medan 5F-4L har ett Prallvärde på 16,9 vilket är det lägsta värdet av alla recepten. Skillnaden i totala väghållarkostnader mellan dessa två är dock marginellt liten.

Om man även tar hänsyn till vägarbetskostnader som trafikstörningar och olyckor på grund av vägarbete, visar betong 5F-4L en fördel med sina långa underhållsintervall. Slutsumman med både väghållarkostnad och vägarbetskostnad blir följaktligen lägst med den betongen. En känslighetsanalys utfördes även där diskonteringsräntan varierades mellan 2% och 5%. Slutsatsen förändrades inte, 5F-4L gav fortfarande lägst resultat. Långtidseffekten av designval är således av stor vikt och rekommenderas att tas i beaktande vid LCC studier.

Tiden till slipning beräknades genom en regressionsanalys av befintliga fältdata från de fem svenska betongvägarna samt Prallvärden som erhöles i detta projekt. Analysen grundar sig på få mätdata men det ger samtidigt intressanta samband som kan undersökas vidare i framtida forskningsprojekt. Denna analys är en väldigt viktig del av LCC studien som möjliggör en jämförelse över hela livslängden.

Sekundärt utfördes även en jämförande analys mellan betongvägen med lägsta respektive största nuvärdeskostnaderna och en asfaltsväg. Resultatet visade att investeringskostnaderna är ungefär lika stora mellan dessa, med fördel betong. Men när underhållet togs med blev skillnaderna tydligare på grund av asfaltsvägens frekventare underhållsintervall. Även bensinbesparing på grund av skillnad i yta togs med i den sekundära analysen. Den baserades på en tidigare studie av VTI och visade att det finns en potential med stora ekonomiska vinster, på 410 miljoner kr, om betong används. Detta baseras dock på ett 2019 års medelvärde i bränslepris, vilket man vet kan fluktuera under en längre period. Men det som påverkar kostnaden mest är ÅDT, antalet tunga och lätta fordon samt skillnaden mellan underlagen. Även om man skulle räkna konservativt med en lika bränslebesparing på 1,1% för alla fordon skulle det ge stora kostnadsvinster.

Sammanfattningsvis kan det konkluderas att det går att bygga både beständiga och ekonomiskt och miljömässigt hållbara betongvägar som dessutom kan ha en stor samhällsekonomisk besparing.

Referenser

1. Dolk, E., J. Silfwerbrand, and S. Erlingsson. *Concrete pavement Falkenberg, Sweden: a 20 year review*. in *11th International Conference on Concrete Pavements (ICCP), San Antonio, August 28-September 1, 2016*. 2016.
2. Silfwerbrand, J., *Betongbeläggningar för flygfält – svenska erfarenheter*. 2018, KTH: Arlanda, 21 aug. 2018.
3. Dolk, E. *Concrete pavements' resistance to studded tyres*. in *XXIII Symposium on Nordic Concrete Research & Development, Aalborg, 2017*. 2017.
4. Wiman, L.G., et al., *Prov med olika överbyggnadstyper: uppföljning av observationssträckor på väg E6, Fastarp-Heberg. 1996-2006*. 2009: Statens väg-och transportforskningsinstitut.
5. Batouli, M., M. Bienvenu, and A. Mostafavi, *Putting sustainability theory into roadway design practice: Implementation of LCA and LCCA analysis for pavement type selection in real world decision making*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017. **52**: p. 289-302.
6. Handayani, et al., *Agency cost estimation on flexible and rigid pavement*. In MATEC Web of Conferences (Vol. 258; p. 02020). 2019. **EDP Sciences**.
7. Dahlin, et al., *Jämförelse mellan asfalt-och betongbeläggningar*. Uppdatering av kalkylmodellen 2Ö (Master's thesis). 2007. **Lunds Tekniska Högskola; Lunds Universitet**.
8. EUPAVE, *Concrete Roads: a Smart and Sustainable Choice*. 2010.
9. Trafikverket, *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.1*. 2018.
10. 15686-5:2008, S.-I., *Byggnader och byggnadsverk - Livslängdsplanering - Del 5: Livscykelkostnader*. (ISO 15686-5:2008; IDT), 2008.
11. Jonsson, P. & Hultqvist, B. Å. 2009. Mätning av bränsleförbrukning på asfalt-och betongbeläggningar norr om Uppsala. Statens väg-och transportforskningsinstitut.
12. SPBI 2020. Årsmedelpriser motorbränslen. Hämtat från: <https://spbi.se/statistik/priser/mer-prisstatistik/arsmedelspriser-motorbranslen/> den 5 maj 2020

Bilagor

A. Betongrecept



Memo

Till: Mats Gustafsson
 Datum: 2019-11-28
 Från: Iad Saleh, NCC

Gällande val av recept till PVM

Den 10 oktober 2019 hade receptgruppen ett Lync-möte kring val av recept till provvägsmaskin (PVM), utifrån de framtagna recepten från totalt 5 provningsomgångar. Efter påpekande från VTI om att för dåligt prallvärde kan ge fel utslag med ett ökande slitage pga studsande hjul valdes ett nytt referensrecept. Nedan är den slutliga, inom referensgruppen, överenskomna receptlistan med motivering:

- Har endast valt recept med luft i för att klara saltfrostbeständighet samt med goda prallvärden, helst under 20 men max 22.
- 5C: Ett recept med bra prall, utan silika och relativt högt vct.
- 4H-2L: Ballast från Hovgården med luft och silika. Alt till Torphyttan. Bästa resultatet från Hovgården.
- 5H-2L: ett av de bästa recepten map Prall.
- 5F-3L: Bra prall värden (<20) med mkt lågt vct och mkt silika, samt stensmjöl.
- 5F-4L: Bästa resultatet map prall, mindre partikelsprång med stensmjöl, moderat cementhalt.
- 5N (amerikansk) referens med ett sämre kulkvarnsvärde i förhållande till de övriga recepten.
- 5O: Amerianskt recept med ok prallvärde och relativt god arbetbarhet. Så få partikelsprång som möjligt, ingen silika och relativt låg cementhalt.

Förutom provvärden så har våra utvärderingskriterier också varit: Produktionsmässighet (på fabrik), arbetbarhet, cementhalt (CO₂) mm.

Sammanställning över recepten med resultat bifogas.

Vänligen, receptgruppen
 Iad Saleh, Niklas Johansson, Thomas Johansson, Sten Hjelm.

Valen recept 1911 28.docx

omgång 1		omgång 2		omgång 4		omgång 5	
Blandning nr		Blandning nr		Blandning nr		Blandning nr	
Stenmaterial		Stenmaterial		Stenmaterial		Stenmaterial	
vct		vct		vct		vct	
Anl FA		Anl FA		Anl FA		Anl FA	
Vatten		Vatten		Vatten		Vatten	
Fyll Sika RMC 320		Sika Emsac 500E		Sika Emsac 500E		Fyll Sika Viskocrete 3040 WC	
Luft Micro Air		Luft Micro RMC 320		Luft Micro RMC 320		Luft Micro Air (10%)	
Grushalt Riksten 0-8 NK		Grushalt Riksten 0-8 NK		Luft Micro Air (10%)		Riksten 0-8 NK	
Stenhalt		Gladd 0-4 K		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Färska egenskaper		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Sättnytt, mm		Stenhalt		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Densitet, kg/m3		Färska egenskaper		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Lufthalt, %		Sättnytt, mm		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Kompakterbarhet, ICT		Densitet, kg/m3		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Kommentar		Lufthalt, %		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Skärkraft vid 10 cykler		Kompakterbarhet, ICT		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
Tryckhållfasthet, 7d		Kommentar		Torphytan 0-4		Torphytan 0-4	
1	43,5	1	Tryckhållfasthet, 28d	1	Tryckhållfasthet, 28d	1	Tryckhållfasthet, 28d
2	46,1	2	1	2	1	2	1
3	44,1	3	75,8	3	75,8	3	56,6
Medel	44,6	Medel	77,6	Medel	77,6	Medel	59,5
1	57,9	1	74,7	1	74,7	1	62,2
2	60,6	2	77	2	77	2	61,2
3	59,1	3	71,9	3	71,9	3	59,1
Medel	59,2	Medel	74,8	Medel	74,8	Medel	59,1
1	4,0	1	5,4	1	5,4	1	5,1
2	4,1	2	5,3	2	5,3	2	5
3	4,3	3	5,1	3	5,1	3	5
Medel	4,1	Medel	5,6	Medel	5,6	Medel	5,1
1	23,9	1	78,4	1	78,4	1	27,6
2	19,5	2	86,4	2	86,4	2	27,4
3	21,9	3	79,5	3	79,5	3	26,0
Medel	21,1	Medel	82,4	Medel	82,4	Medel	26,4
1	0,01	1	81,3	1	81,3	1	24,4
2	0,01	2	23,1	2	23,1	2	24,4
3	0,01	3	21,8	3	21,8	3	21,3
Medel	0,01	Medel	18,9	Medel	18,9	Medel	22,8
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel	0,08	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2	0,10	2	0,10	2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	7 cykler	1	7 cykler	1	0,01
2	0,01	2	14 cykler	2	14 cykler	2	0,01
3	0,01	3	28 cykler	3	28 cykler	3	0,02
Medel	0,01	Medel	42 cykler	Medel	42 cykler	Medel	0,01
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel	0,08	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	7 cykler	1	7 cykler	1	0,01
2	0,01	2	14 cykler	2	14 cykler	2	0,01
3	0,01	3	28 cykler	3	28 cykler	3	0,02
Medel	0,01	Medel	42 cykler	Medel	42 cykler	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel	0,08	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	7 cykler	1	7 cykler	1	0,01
2	0,01	2	14 cykler	2	14 cykler	2	0,01
3	0,01	3	28 cykler	3	28 cykler	3	0,02
Medel	0,01	Medel	42 cykler	Medel	42 cykler	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel	0,08	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	7 cykler	1	7 cykler	1	0,01
2	0,01	2	14 cykler	2	14 cykler	2	0,01
3	0,01	3	28 cykler	3	28 cykler	3	0,02
Medel	0,01	Medel	42 cykler	Medel	42 cykler	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel	0,08	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	7 cykler	1	7 cykler	1	0,01
2	0,01	2	14 cykler	2	14 cykler	2	0,01
3	0,01	3	28 cykler	3	28 cykler	3	0,02
Medel	0,01	Medel	42 cykler	Medel	42 cykler	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel	0,08	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	7 cykler	1	7 cykler	1	0,01
2	0,01	2	14 cykler	2	14 cykler	2	0,01
3	0,01	3	28 cykler	3	28 cykler	3	0,02
Medel	0,01	Medel	42 cykler	Medel	42 cykler	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel	0,08	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	7 cykler	1	7 cykler	1	0,01
2	0,01	2	14 cykler	2	14 cykler	2	0,01
3	0,01	3	28 cykler	3	28 cykler	3	0,02
Medel	0,01	Medel	42 cykler	Medel	42 cykler	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel	0,08	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	7 cykler	1	7 cykler	1	0,01
2	0,01	2	14 cykler	2	14 cykler	2	0,01
3	0,01	3	28 cykler	3	28 cykler	3	0,02
Medel	0,01	Medel	42 cykler	Medel	42 cykler	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel	0,08	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	7 cykler	1	7 cykler	1	0,01
2	0,01	2	14 cykler	2	14 cykler	2	0,01
3	0,01	3	28 cykler	3	28 cykler	3	0,02
Medel	0,01	Medel	42 cykler	Medel	42 cykler	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel	0,08	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	7 cykler	1	7 cykler	1	0,01
2	0,01	2	14 cykler	2	14 cykler	2	0,01
3	0,01	3	28 cykler	3	28 cykler	3	0,02
Medel	0,01	Medel	42 cykler	Medel	42 cykler	Medel	0,02
1	0,01	1	56 cykler	1	56 cykler	1	0,01
2	0,01	2		2		2	0,02
3	0,01	3		3		3	0,02
Medel	0,01	Medel		Medel		Medel	0,02
1	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
2	0,01	2	0,03	2	0,03	2	0,01
3	0,01	3	0,06	3	0,06	3	0,02
Medel	0,01	Medel	0,08	Medel			

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 200 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 5604, 114 86 STOCKHOLM
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Infrasstruktur och
betongbyggande
RISE Rapport 2020:
ISBN: