

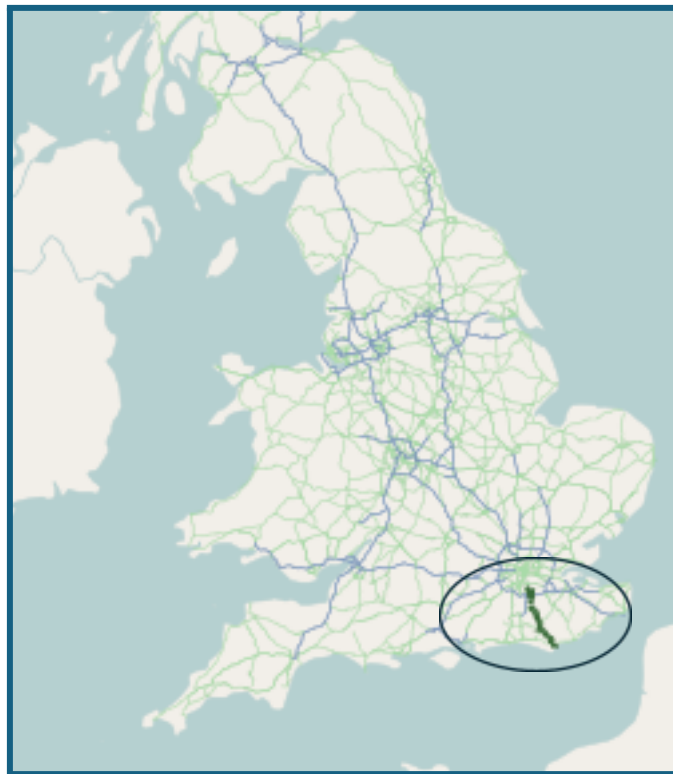
Livscykel förlängning av primära asfaltvägar under kommunal förvaltning med hjälp av geopolymerinjektering

Grundförstärkning på A22 London Road, Forest Row

1.0 Inledning

A22 är en klass A-väg (huvudväg) som passerar genom grevskapen East Sussex, West Sussex, Surrey och Greater London. Vägen är en enkel körbana med en ungefärlig längd på 48 miles (78 km).

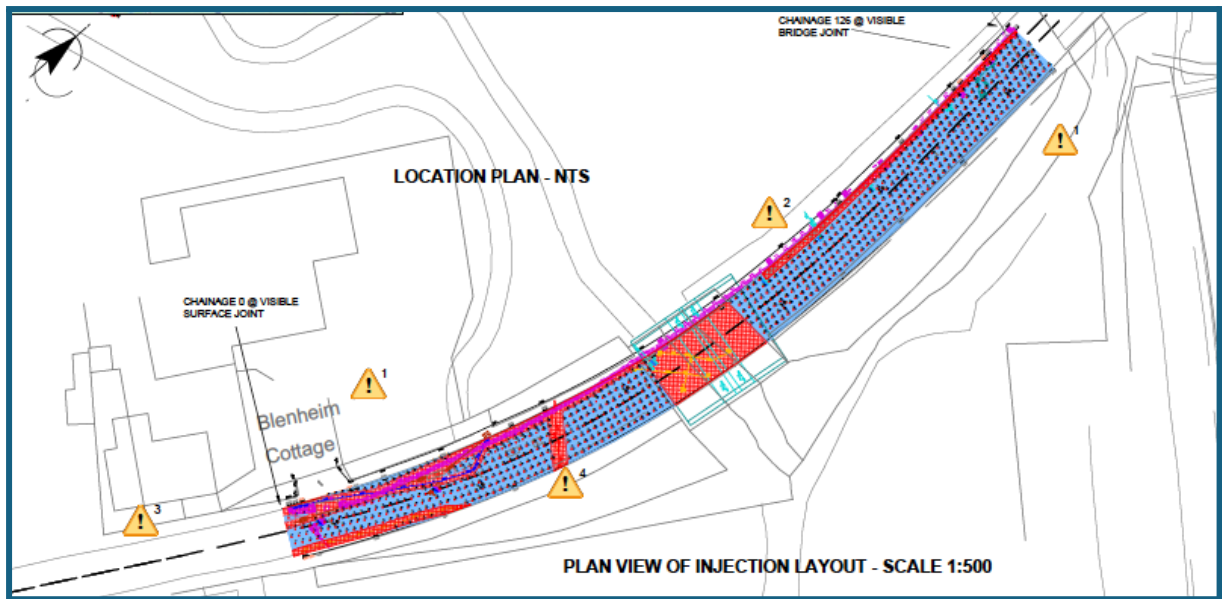
Den bär en blandning av privat och kommersiell trafik i en nord-sydlig riktning och förbinder Eastbourne-området vid East Sussex-kusten med Greater London. En översiktskarta visas nedan i Figur 1.



Figur 1. A22 – översiktskarta

Den sektion av A22 som behandlas i denna tekniska rapport förvaltas av East Sussex County Council, och vägunderhållskontraktet drivs för närvarande av Balfour Beatty Living Places. Tillsammans arbetar myndigheten och underhållsentreprenören i partnerskap för att hantera de övergripande väghållningstjänsterna inom grevskapet.

Denna rapport avser ett specifikt underhållsprojekt på en sektion av A22 London Road, lokalt kallad Forest Row. Vägen är en klass A-väg (huvudväg) i ett landsbygdsområde.



Figur 4. A22 London Road, Forest Row - situationsplan

2.0 Trafikbelastning

Konstruktörer för vägöverbyggnader från Geobear Infrastructure har genomfört en granskning av mätpunkterna för trafikräkning i lokalområdet. Räknestation ID 8450 norr om objektet har identifierats som den närmaste relevanta mätpunkten för trafikdata.

Denna sträcka är en enkelfilig väg och uppvisade under 2024 en årsdygnstrafik (ÅDT/AADT) i båda riktningarna på över 15 000 motorfordon. ÅDT definieras som den totala trafikvolymen på en vägsträcka under ett år dividerat med 365 dagar. I enkla termer är ÅDT-flödet ett mått på vägens trafikintensitet och används som standardmetod för att utvärdera fordonstrafikens belastning på denna specifika vägsträcka.

Belastningen från tunga lastbilar (HGV) och kollektivtrafikfordon/bussar (PSV) är den primära orsaken till strukturella skador i vägöverbyggnaden, varför det enkelriktade genomsnittliga dygnstrafikflödet (AADF) på 256 tunga fordon/dag respektive 35 bussar/dag har lagts till grund för analysen av livscykel förlängningen.

En sammanställning av väglitagefaktorer för kommersiella fordon per klass, samt beräkningen av miljoner standardaxlar (msa) som belastar vägen årligen, redovisas i Tabell 1 och 2 nedan.

Commercial vehicles (cv)		New W_M	Maintenance W_M
cv class	Buses and coaches	3.9	2.6
	2-axle rigid	0.6	0.4
	3-axle rigid	3.4	2.3
	4-axle rigid	4.6	3.0
	3 and 4-axle articulated	2.5	1.7
	5-axle articulated	4.4	2.9
	6-axle articulated	5.6	3.7
cv category	OGV1 + PSV	1.9	1.3
	OGV2	4.9	3.2
All commercial vehicles		4.0	2.7

Tabell 1. Vägslitagefaktorer för kommersiella fordonsklasser – Underhåll W_M

Vehicle Class		AADF	Growth Factor	Wear Factor	Weighted Annual Traffic
		(F)	(G)	(W_M)	(msa)
Buses and Coaches (PSV 1)		69	1	2.6	0.07
OGV 1					
2 axle rigid		208	1	0.4	0.03
3 axle rigid		54	1	2.3	0.05
OGV 2					
4 axle rigid		48	1	3.0	0.05
3 & 4 axle articulated		28	1	1.7	0.02
5 axle artic		51	1	2.9	0.05
6 axle artic		52	1	3.7	0.07
	Total Daily 2 way Flow	510	Total weighted annual traffic		0.34
			Total weighted 1 way annual traffic		0.17

Tabell 2. Enkelriktat trafikflöde och msa för A22 under 2024

3.0 Vägunderhåll - defekter och åtgärder

Historiskt sett har körbanan drabbats av deformationer och rörelser i bärlagret, vilket lett till en försämring av slitlagret (körytan). Följaktligen krävdes ett utbyte av beläggningen över körbanans fulla bredd. Detta beläggningsunderhåll kunde emellertid först genomföras efter att underhållsteamet utfört ett flertal avhjälpande reparationer och strukturella förbättringar av vägöverbyggnaden.

Som exempel på avhjälpande åtgärder identifierades tre defekta avvattningsledningar. Skadorna åtgärdades framgångsrikt genom relining med ljushärdat foder. Denna renoveringsmetod förhindrar att ytvatten läcker ut från ledningarna och infiltrerar de omgivande bärlagren. En komplett förteckning över samtliga avhjälpande åtgärder beskrivs i avsnitt 3.2.

En tidigare undersökning har utförts på körbanan i både nord- och sydgående körfält. Markradarundersökning (GPR) genomfördes av beställaren för att få bättre information om bärlagrens tillstånd. Markradarresultaten visade att körbanan tidigare hade konstruerats av grovkornigt obundet material och behövde undersökas ytterligare. Provtagning av obundna material (UMS) användes för att identifiera beskrivningar och tjocklek på skikten under asfaltslagren.

Den fullständiga UMS-rapporten återfinns i Bilaga B.

UMS-proverna visar och bekräftar att den ursprungliga dimensionerings- och byggnadsfilosofin baserades på ett utförande med "enbart förstärkningslager" (capping only).

3.1 Skikt tjocklek

Information om överbyggnadens skikt tjocklekar krävs för att beräkna vägkonstruktionens restlivslängd. Denna information används för underhållsplanering och för att utforma eventuella förstärkningsåtgärder, såsom geopolyminjektering, för att förbättra bärlagret. Åtgärdslösningen bestod av en expansiv geopolym för att fylla hålrum och konsolidera de uppfyllda marklagren. Förstärkningslagret består huvudsakligen av friktionsmaterial, och undergrunden är övervägande kohesiv.

3.2 Identifiering av förändringar i överbyggnaden

Borrkärneprotokollen visar att asfaltmaterialstyperna varierar och inkluderar slitlager, ytbehandling och bindlager. Den totala asfalt tjockleken varierar mellan 200 och 260 mm.

Information om förändringar i vägkonstruktionen krävs för att beräkna vägbanans livslängdsförlängning. Vanligtvis kan markradar upptäcka var det finns dolda ledningsgravar. Direkta bevis på konstruktionsförändringar som upptäckts med markradar kan erhållas och bekräftas genom kärnborring.

Borrkärneloggarna återfinns i Bilaga C1 – Avsnitt 1 & 2.

Utifrån denna inledande undersökning drogs slutsatsen att överbyggnadens livslängd kunde förlängas. Följaktligen utarbetades ett program för underhållskrav där arbetsomfattningen inkluderade:

- Byte av brunnstäckningar samt justering av befintliga brunnslöck och gallerbrunnar.
- Brunnrensning,
- Reparation av befintliga dagvattenledningar med ett foder certifierat av Water Research Centre,
- Mindre kantstensreparationer,
- Fräsning/avlägsnande av befintligt slitlager,
- Utbyte av högfriktionsbeläggning,
- Återställande av vägmarkeringar.

Följt av:

- In-situ grundförstärkning med hjälp av geopolymerinjektering, före
- återställande av slitlager, högfriktionsbeläggning och vägmarkeringar.

4.0 Geopolymerinjektering – utförande

Den specialiserade injekteringsutrustning som Geobear Infrastructure använder på plats är installerad i ett helt självförsörjande servicefordon. Fordonet fungerar som en invallning för materialkomponenterna och inrymmer samtliga enskilda enheter som krävs för injekteringsprocessen. Injekteringsutrustningen och processen beskrivs kortfattat nedan:

Pump: En pumpenhet med kapacitet att injektera geopolymermaterial under tryck genom ett borrar hål under vägkonstruktionen. Pumpen kan även reglera materialets flödes hastighet för att tillförsäkra exakt den mängd geopolymer som krävs för att stabilisera och lyfta konstruktionen.

Kontrollenheter: System som används för att upprätthålla korrekt temperatur och proportionell dosering vid blandningen av geopolymermaterialet i enlighet med Geobears patenterade specifikation.

Elektriska bormaskiner: Handverktyg som används för att borra hål med en diameter på 16 mm genom överbyggnaden.

Laseravvägning: Laserinstrument som används för att detektera ytrörelser i steg om 0,5 mm med realtidsavläsning.

4.1 Metodbeskrivning och konstruktionskrav för geopolymerinjekttering

En serie hål borrades med projekterade intervall över hela behandlingszonen. Hålen med en diameter på 16 mm borrar genom överbyggnadslagren till ett djup som penetrerar asfaltslagren och når ned i de underliggande geotekniska lagren. Borrhålen utfördes så vinkelrätt mot vägbanans yta som möjligt. Planen för bormönster och djup redovisas i Bilaga A.

Geobears geopolimerer bildas när flera kemiska komponenter blandas under själva injekteringskedet. Processen sker under ett lågt injekteringsstryck vilket initierar en kontrollerad kemisk reaktion, så kallad polymerisation. Under polymerisationen övergår den nybildade geopolimeren från flytande till fast form, varvid den expanderar upp till 10 gånger sin ursprungliga volym.

Geopolymermaterialets komponenter injekteras under asfaltbeläggningen för att fylla eventuella hålrum i de bärande lagren. Mängden ytrörelse kontrolleras via pumpenheten och injekteringspistolen genom att mäta injekteringshastigheten. Själva hålrumsfyllningen mäts genom att övervaka små stegvisa rörelser i beläggningen vid vägbanans yta. Rörelsen mäts i millimeter och kallas för en *flicker* (mikrorörelse). Installationsteamet använder denna indikation på rörelse för att avgöra när hålrummet är helt fyllt.

Geopolymeren injekterades även i de bärande lagren för att förbättra bärighetskapaciteten i både friktions- och kohesionsmaterialen.

Efter slutfört arbete avlägsnades injekteringsrören och hålen förseglades med ett krympfritt sandcementbruk. Borrkax och eventuell överskottsmaterial städades upp efter varje arbetsskift innan körbanan åter öppnades för trafik.

5 Testmetoder och kontrollprocedurer

Provtagningen lades ut på underentreprenad till PTS (Pavement Testing Services). PTS är UKAS-ackrediterade för provningsaktiviteter in-situ, däribland provtagning genom kärnbörning och DCP-analys (Dynamic Cone Penetrometer).

5.1 Provtagning ocg kärnbörning

Fyra stycken borkärnor med en nominell diameter på 150 mm togs genom vägoöverbyggnaden med en släpvagnsmonterad kärnbörningsrigg på de platser som definierats i arbetsomfattningen. Varje kärna undersöktes och loggades på plats innan den paketerades och transporterades till laboratorium för lagring.

Sammanfattningsvis konstaterades att asfaltlagren hade en total tjocklek på 200–260 mm och utgjordes av olika asfaltlager. Asfaltlagren bestod av 20 mm bindlager- och 32 mm bärlagermaterial. Detta överensstämmer med en historisk data som tidigare applicerats som underhållsåtgärd.

5.2 Dynamisk konpenetrometeranalys (DCP)

Dynamisk konpenetrometer (DCP) är ett instrument avsett för snabb in-situ-bestämning av de strukturella egenskaperna hos befintliga vägöverbyggnader uppbyggda av obundna material.

Den robusta och enkla konstruktionen gör DCP-instrumentet snabbarbetat, bärbart och enkelt att hantera. Ett typiskt test tar endast ett par minuter, vilket innebar att DCP utgjorde en mycket tidseffektiv metod för att samla in bärighetsdata från vägöverbyggnaden.

De inledande DCP-testerna utfördes av PTS och resultaten återfinns i Bilaga C2 – Avsnitt 3.

DCP-sonderingen identifierade de svagare delarna i bärlagret, vilket gjorde det möjligt för Geobear att ta fram en ritning över injekteringspunkterna. Dessa resultat användes tillsammans med visuella inspektioner på plats för att fastställa omfattningen och djupet för geopolymerens injekteringspunkter.

5.3 Hejarsondering (Dynamic probe testing)

Hejarsondering är en geoteknisk fältundersökningsmetod där en sond slås ned i jorden med hjälp av en fallvikt. Antalet slag av en standardiserad hejare mäts för var 100 mm penetration. I detta projekt utfördes in-situ-testningen med en 30 kg tung hejare på fyra olika platser.

Slagantalet per 100 mm kan i kohesionsjordar användas för att korrelera mätningarna till en jordartsklassificering och geoteknisk beskrivning. Slagantalet per 100 mm penetration mättes i intervall mellan 600 mm och 1000 mm under vägbanans yta.

Branschgodkända korrelationer har etablerats mellan DP-mätningar och motståndet (N-värdet) vid Standard Penetration Test (SPT), vilka i sin tur kan konverteras till konventionella in-situ CBR-värden (California Bearing Ratio). Detta innebär att de fältmätta hejarsonderingsresultaten kan tolkas och omräknas till in-situ CBR-värden som kan användas i vägöverbyggnadsanalysen.

Inom ramen för A22-projektet utfördes hejarsondering både före och efter behandlingen. Följaktligen gjordes en jämförelse av värdena före respektive efter åtgärd för att utvärdera förbättringen av bärlagrets/underbyggnadens CBR-värden.

5.4 Sammanfattning av provningsresultat

En sammanställning av CBR-data före och efter injektering redovisas i tabellen nedan.

Location	Pre-geopolymer treatment CBR (%)	Post-geopolymer treatment CBR (%)	Increase in CBR (%)
1	2.6	4.8	2.2
2	7.4	8.5	1.1
3	2.8	4.7	1.9
4	2.9	5.5	2.6

Overall Average	3.9	5.9	2.0
-----------------	-----	-----	-----

Tabell 2 – Ökning av CBR (%) efter geopolymertbehandling

6.0 Utvärdering och tolkning av resultat

Baserat på trafikberäkningarna i Tabell 1 uppgår ÅDT-flödet för kommersiella fordon till 256 tunga lastbilar och 35 bussar. Denna fordonshastighet, trafiksamansättning och en standardiserad tillväxtfaktor motsvarar en belastning på 0,17 msa per år i en köriktning.

Enligt Tabell 2 utfördes DCP-mätningar före och efter geopolymertinjeringen. De behandlade materialen uppvisar en ökning av undergrundens CBR-värden med 2,0 %, vilket motsvarar en bärighetsökning med i genomsnitt 51 %.

Riktlinjer för dimensionering och analys av vägöverbyggnader har utvecklats under flera decennier genom publicering av ett flertal regelverk och handböcker. Tidslinjen omfattar:

Transport Road Research Laboratory (TRRL), *the structural design of bituminous roads*, Report LR1132, vilket ledde till HD25/94 *Foundations, design manual for roads and bridges* (DMRB) samt Interim Advice Note (IAN) 73 (2006). Detta har slutligen utmynnat i modernare tillämpningar som omfattas av National Highways, *standards for highways, design manual for roads and bridges* (DMRB) CD 225 – *design for new pavement foundations*.

Över tid bygger dessa centrala dokument på tidigare fullständiga vägöverbyggnadsanalyser och tillhandahåller dimensioneringsunderlag för underhållsingenjörer inom den offentliga sektorn. Grundprincipen i dessa riktlinjer fokuserar på skydd, stabilisering och förstärkning av vägunderbyggnaden.

CD 225, publicerad 2020, fastställer dimensioneringsproceduren för vägunderbyggnader baserat på underbyggnadens förmåga att motstå de trafikklaster som appliceras dels under byggskedet, dels under vägens återstående drifttid. Geopolymertåtgärden adresserar direkt principen om livscykelörlängning genom att öka denna tekniska livslängd.

CD 225 introducerar konceptet att överbyggnadens tjocklek baseras på fyra styvhetsklasser för underbyggnaden, vilka definieras som den långsiktiga styvheten hos den sammansatta underbyggnaden under den färdiga överbyggnaden.

De fyra underbyggnadsklasserna definieras i tabellen nedan:

Foundation class	Long term stiffness of composite foundation E (MPa)	Foundation construction
FC1	≥ 50	Capping layer only
FC2	≥ 100	Sub-base only and Capping layer and sub-base
FC3	≥ 200	Hydraulically bound materials (HBM)
FC4	≥ 400	

Capping layer ONLY	Long term stiffness of composite foundation	Foundation Class
	E (MPa)	
Pre-treatment	42.1	Unclassified
Post-treatment	54.9	FC1

Tabell: Förändring av styvhetsmodul och klassificering

För att analysera vägöverbyggnadens långsiktiga prestanda kan ingenjörer omvandla de beräknade CBR-värdena till en styvhetsmodul genom att använda sambandet:

$$\text{Styvhetsmodulen } E \text{ (MPa)} = 17.6 \times (\text{CBR})^{0.64} \quad \text{Ekvation 1.}$$

Med hjälp av Ekvation 1 har styvhetsmodulen före och efter geopolymerbehandling beräknats och sammanfattats i tabellen ovan.

En projektrapport publicerad av Transport Research Laboratory, *TRL Project report PR127* från 2006, utnyttjar maximal deformation i undergrunden samt nedböjning för att bestämma tjockleken på det övre underbyggnadslagret. I fallet med A22 utgörs detta övre underbyggnadslager av förstärkningslagret (capping layer). Som framgår av tabellen har geopolymerbehandlingen höjt bärighetsprestandan och effektivt omklassificerat underbyggnaden, från statusen "ingen underbyggnadsklass uppnådd" till nivå FC1.

En praktisk tillämpning av underbyggnadsanalys görs tillgänglig för dimensionerare genom det amerikanska dimensioneringsförfarandet AASHTO 93 – *Guide for Pavement Structures* (American Association of State Highway and Transportation Officials). AASHTO-metodiken kan användas för att bakåtanalysera den totala överbyggnaden för att påvisa vilken effekt en ökad underbyggnadsstyvhet har på den tillåtna trafikbelastningen uttryckt i msa. Skiktjockleken och egenskaperna hos asfaltlagren hålls konstanta för både tillståndet före och efter behandling så att en direkt jämförelse kan göras.

Analysmodellen består av en treskiktsmodell med 200 mm asfalt och 300 mm förstärkningslager (capping) vilande på en undergrund. Alla övriga parametrar är fixerade så att effekten av den ökade styvheten i vägunderbyggnaden kan studeras isolerat.

Analysen visar att geopolymerbehandlingen har utökat den dimensionerande trafiklivslängden med ytterligare 1,57 msa. Givet att A22 belastas med 0,17 msa/år baserat på trafikflödet 2024, motsvarar denna förbättring en förlängning med ytterligare 9,2 år under antagande om trafikillväxt. Relativt små

bärighetsförbättringar i undergrunden kan således ge en mycket stor ökning av den dimensionerande trafikmängden under livscykeln.

Sammanfattningsvis har livslängden för den geopolymertbehandlade sektionen av A22 förlängts med 9 år.