



**UNIVERSITETET I
CAGLIARI**

Institutionen för samhällsbyggnad och miljöteknik och arkitektur - DICAAR
Föreståndare: Professor i ingenjörsvetenskap Giorgio Massacci



FORSKNING OCH FÖRSÖK MED CELLBETONG I BYGG- OCH VÄGINFRASTRUKTUR



Vetenskaplig chef:
Prof. Mauro Coni

Testning och databehandling:
James Rombi (ingenjör)
Marta Salis (ingenjör)

1. Verksamhetsplan

Den 05/12/2023 undertecknades ett forskningsavtal mellan Isoltech srl och University of Cagliari - Institutionen för civilteknik, miljö och arkitektur, med titeln "FORSKNING OCH FÖRSÖK PÅ CELLBETONG I KONSTRUKTION OCH VÄGINFRASTRUKTUR" som varar i 18 månader.

Syftet med studien var att analysera cellbetongens verkliga kapacitet när det gäller mekanisk hållfasthet och hållbarhet, med hänsyn till inverkan av miljöförhållanden. Studien omfattade försök, laboratorie- och on-site analyser och tester samt direkta undersökningar av materialet.

Forskningen delades in i följande aktiviteter:

1. Mekaniska försök på cellulära betongprover, med olika grader av densitet;
2. Mekaniska försök på tunna lager av vägbeläggningar som gjorts speciellt i samarbete med vägoperatörer;
3. Provning av tryckhållfasthet;
4. Provning av indirekt draghållfasthet;
5. Provning av utmattning;
6. FWD-testning (Falling Weight Deflectometer), med olika belastningskonfigurationer;
7. Utarbetande av rapporter och publikationer;
8. Utarbetande av specifika inköpsspecifikationer och bedömningsobjekt;
9. Presentation och distribution av resultaten.

Forskningsavtalet innehåller tre etapper:

- Steg 1: Verksamhetsplan
- Steg 2: Delårsrapport
- Steg 3: Slutrapport

som har inkluderats i detta dokument, enligt överenskommelse med uppdragsgivaren.

DEN OPERATIVA PLANEN

I inledningsskedet ägnades särskild uppmärksamhet åt valet av provningar som skulle utföras och åt att definiera försökssträckan för att säkerställa att den var lämplig för att kontrollera den skummade cementens prestanda. De möjliga metodologiska tillvägagångssätten analyserades i detalj för att identifiera de avgörande parametrarna för att karakterisera cellbetong i stället för cementblandningar för baslager, och styvhetsmodulen E_{mg} för dess användning i stället för den granulära blandningen i vägfundament. Andra prestandaparametrar som verifierades i laboratoriet och på plats var tryckhållfasthet σ_{χ} och vertikal deformation på förstärkningslagernivå $\varepsilon_{\sigma\beta}$.

Det var viktigt att noggrant välja ut dessa delar för att säkerställa att de efterföljande försöksstegen var giltiga och effektiva.

Parametrarna kan bestämmas antingen i laboratoriet eller på plats, och därför var det nödvändigt att förbereda lämplig pilotbeläggning. I detta syfte hölls en rad diskussioner med väginfrastrukturoperatörer på Sardinien, t.ex. provinsförvaltningarna i Cagliari och södra Sardinien, ANAS, Sardiniens hamnmyndighet och storstaden Cagliari. Alla parter var mycket intresserade av att stå värd för ett särskilt pilotförsök på vägsträckor inom pågående projekt. I synnerhet identifierade storstaden Cagliari och hamnmyndigheten på Sardinien specifika delar av vägar som skulle omfattas av underhåll och som skulle kunna rymma vägbeläggning med lager av cellbetong.

I väntan på att genomföra dessa försök tog vi tillfället i akt att utföra viktiga urbaniseringsarbeten i kommunen Elmas, som betjänar Cagliari flygplats och det nya kommersiella konglomeratet (tidigare FAS). Det handlade om att skapa den första försökssträckan på en cykelbana som höll på att byggas.

Därefter analyserades liknande ansökningar i det andra skedet av arbetet. Primärtplanerades ett ordentligt ingenjörsbesök för att observera utfallet hos skumbetongapplikationen på väg K51, avfarten Hagen, i norra Tyskland.

Vid besöket den 9 och 10 oktober 2023 deltog konstruktörerna av väg K51, forskare från universitetet i Cagliari och vägnätschefen för storstaden Cagliari. De tekniker och tester som genomfördes under mötena visade på tillfredsställande prestanda både när det gäller stabilisering av granulatblandningar och tillverkning av cementblandningar.

Under den tredje etappen låg fokus främst på att interagera med viktiga intressenter, inklusive representanter för storstaden Cagliari och de företag som deltog i genomförandet av projektet (cementleverantörer, installatörer, platsingenjörer). I detta skede ingick att organisera en serie möten som syftade till att bättre definiera projektets mål, blandningarnas egenskaper och försiktighetsåtgärder under installationen, samt att identifiera möjligheterna att använda cellbetong.

Det fjärde steget var installationen.

DELÅRSRAPPORT

Under tiden definierades provinstallationen med det specifika målet att testa användningen av cellbetong i vägbeläggningar under verkliga förhållanden, och namngavs med akronymen FoAM_PAVS (Forming Aerated Materials for Pavement Application Valuation Sustainability).

Cellbetong har använts i över 70 år och har ett brett spektrum av applikationer. Det används i civil och industriell konstruktion, parkeringsplatser, arrestorbäddar för landningsbanor på flygplatser, golvplattor och golvbeläggningar, fyllning för naturliga håligheter och skydd för strukturella element, samt fyllning och isolering vid konstruktion av prefabricerade byggnader, men det finns inga kända tillämpningar i Italien relaterade till vägfundament och baslager. Materialet är mycket flytande och kan pumpas och bearbetas under installationen, så det behöver inte spridnings-, befuktnings-, nivellerings- och valsningsfaserna, vilket resulterar i stora besparingar i tid och energikostnader.

Det finns ytterligare fördelar på grund av det faktum att materialet endast består av cement utan ballast, vilket helt eliminerar kostnaderna för paddning, krossning, siktning, blandning och transport som behövs för att producera cementbundna granulära blandningar. Förutom dess lätthet efter installationen kan dess styrka, termiska och akustiska isoleringsförmåga, okänslighet för vatten, hållbarhet och låga kostnader regleras.

Andra fördelar med materialet inkluderar dess hållbarhet. I själva verket:

- Skummedlet är av vegetabiliskt ursprung och är nästan helt biologiskt nedbrytbart;
- Dess lätthet och smidighet begränsar förbrukningen och utsläppen i samband med transport och produktion av materialet
- Cellbetong är självutjämnande och behöver inte spridas, jämnas ut och komprimeras, vilket minskar tid, kostnader och utsläpp i samband med dessa processer.
- Dess vibrationsdämpande och avledande egenskaper samt dess ljud- och värmeisolerande egenskaper är också av särskilt intresse.

Cellbetong används i stor utsträckning inom vägsektorn i Nordamerika och har nyligen använts vid konstruktion av lätta förstärkningslager, fundament och baslager i vägbeläggningar i Tyskland och Östasien.

Syftet med det FoAM_PAVS försöket är därför att verifiera om och hur cellbetong kan användas för att konstruera förstärkningslager, fundament och bärlager i vägbeläggningar i enlighet med specifika italienska byggstandarder och metoder.

Pilotprojektet möjliggjordes genom samarbete och tillgänglighet mellan Impresa Pellegrini, Isoltech och forskargruppen "Vägar, järnvägar och flygplatser" vid DICAAR vid universitetet i Cagliari som en del av initiativet "Sardinia Green Roads".

Efter de möten som hölls för att ta reda på mer om materialet och dess internationella användning, packade och skickade Isoltech srl cylindriska prover till DICAAR-laboratoriet i september 2023, som tidigare överenskommits med DICAAR-forskarna.

I laboratoriet delades 14 prover efter densitet och utsattes för indirekt dragprovning (Rt). I följande tabell sammanfattas de tester som utförts (tabell 1).

Tabell 1. Draghållfasthetsvärde σ_{RT}

DETERMINING INDIRECT TENSILE STRENGTH REDUCTION ACCORDING TO EN 12390-6										
	Weight	Average dimensions (mm)		Failure load	Failure load	Indirect Strength Load	Mixture	Average Failure load	W/C ratio	Rapporto A/C
Label	(g)	D	L	(N)	(kg)	(N/mm ²)	Description per (m ³)	(N/mm ²)		
1-500D	830	95,45	202,0	6570,45	670,0	0,22	Cement 52.5 = 400 kg Increment L = 1kg water = 160 kg Foaming agent SL 3% in water	0,20	0,4	0,4
2-500C	815	95,40	201,0	5883,99	600,0	0,20				
3-500A	860	95,4	202,0	5883,99	600,0	0,19				
4-500B	850	96,20	202,0	5687,85	580,0	0,19				
6-600A	920	96,7	203,8	4314,92	440,0	0,14	Cement 52.5 = 500 kg Increment L = 1kg water = 200 kg Foaming agent SL 3% in water	0,15	0,4	0,4
7-600B	920	96,30	201,3	4903,32	500,0	0,16				
8-600C	950	95,93	204,3	4118,79	420,0	0,13				
9-600D	940	95,9	203,7	4903,32	500,0	0,16				
10-600B mix	470	96,09	128,96	4118,79	420	0,21	Cement 52.5 = 200 kg Increment L = 1kg water = 220 kg Foaming agent SL 3% in water Filler 300 kg - 55% Calcium carbonate 45% Magnesium Carbonate	0,21	0,44	0,44
11-600A mix	660	95,23	178,40	5295,59	540	0,20				
12-400A	580	97,02	185,56	2941,99	300,00	0,10	Cement 52.5 = 320 kg Increment L = 1kg water = 130 kg Foaming agent SL 3% in water	0,10	0,41	0,41
13-400D	585	95,53	181,60	2745,86	280,00	0,10				
14-400C	600	95,71	187,00	3138,12	320,00	0,11				
5-400B	650	95,77	204,0	2941,99	300,0	0,10				

Med dessa värden kan cellbetong användas både som basskikt och som grundskikt genom att reglera doseringen och motsvarande hållfasthet.

Sammanfattningsvis kan man säga att cementblandningen för bärlagret kan ersättas med skumbetong med en blandningsdesign som ger en densitet högre än 700 kg/m³. Den som användes i provinstallationen hade följande sammansättning:

- ✓ 550 kg/m³ cement
- ✓ 1,2 l/m³ skummedel
- ✓ 1,2 l/m³ vattenreducerande medel

Den obundna granulära blandningen för grundskiktet kan ersättas med cellbetong med en blandningsdesign som ger en densitet på 400 kg/m³. Provininstallationen använde följande sammansättning:

- ✓ 330 kg/m³ cement
- ✓ 1,2 l/m³ skummedel
- ✓ 1,2 l/m³ vattenreducerande medel

Provininstallationen lades längs den cykelväg som håller på att byggas på det vägnät som betjänar det nya kommersiella komplexet intill Cagliari flygplats (figur 1).



Figur 1. Plats för provinstallationen

I provinstallationen användes cellbetong både som basskikt och som grundskikt (Figur 2).

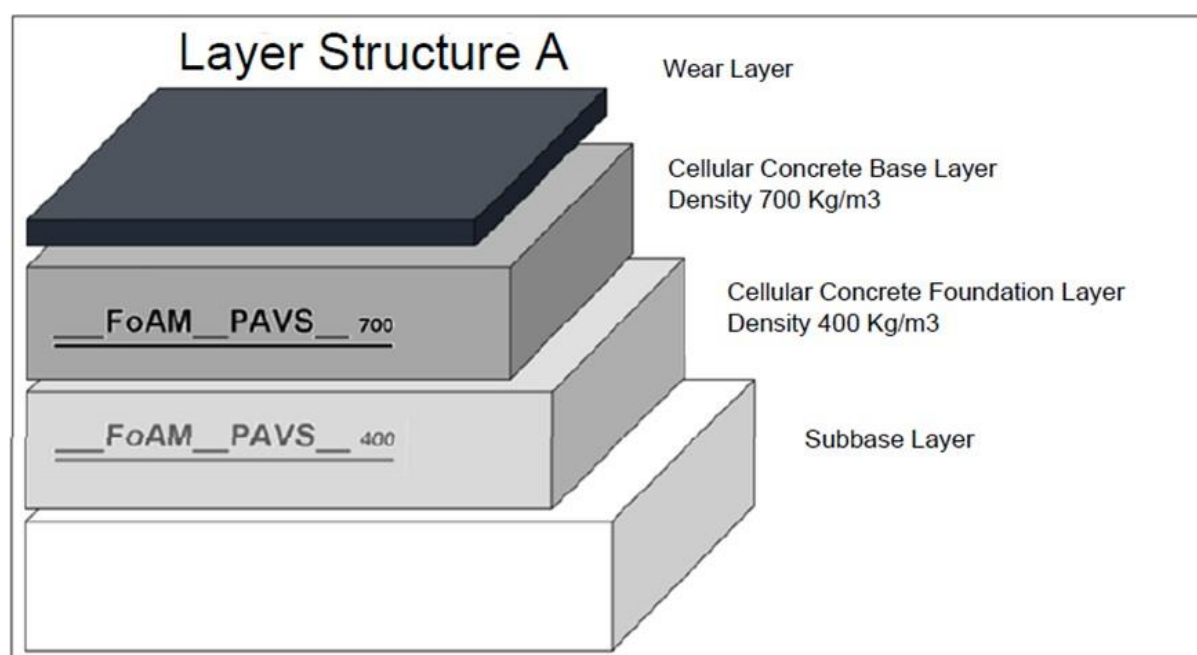
Lagerstruktur A. Både grund- och grundlagren gjordes med cellbetong.

Lagerstruktur B. Endast baslagret tillverkades med cellbetong.

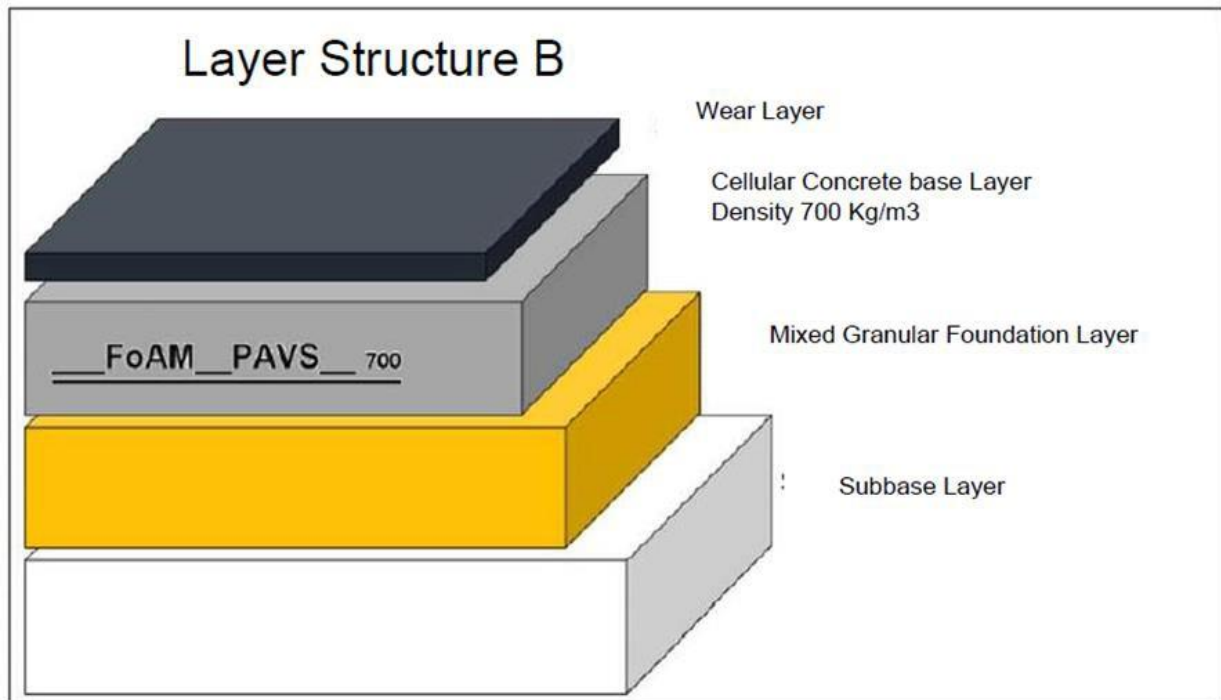


Figur 2. Lagerstruktur för försöksavsnittet

Lagerstrukturerna för sektion A och sektion B visas i figur 3 respektive figur 4.



Figur 3. Lagerstruktur för sektion A



Figur 4. Lagerstruktur för sektion B.

De minsta målen för blandningsdesign för denna provinstallation var att:

- uppnå en böjlig draghållfasthet σ_{τ} på 0,25 MPa vid gränsytan mellan bas och fundament, ett värde som motsvarar den acceptabla gränsen för ett vägbärlager tillverkat av en cementblandning;
- uppnå lägre vertikala deformationer $\varepsilon_{\sigma\beta} < 800$ μ töjning på förstärkningsplattan.
- uppnå en tryckhållfasthet $> 2,5$ MPa.

Under provinstallationen togs flera prover för tryck- och böjhållfasthetsprovning vid DICAAR-laboratorierna (University of Cagliari).

Tester utfördes sedan på den färdiga beläggningen med hjälp av Fast Falling Weight Deflectometer (Fast-FWD).

2. Slutrapport

Den 09/04/2024 och 10/04/2024 installerades provcellbetong längs cykelvägen som byggs på vägnätet som betjänar det nya kommersiella komplexet intill Cagliari flygplats (figur 5).



Figur 5. Provinstation

Som illustrerats tidigare tillverkades i avsnitt A endast basskiktet med cellbetong med en densitet på 700 kg/m³, medan i avsnitt B gjordes både basskiktet (densitet 700 kg/m³) och fundamentalsiktet (400 kg/m³) med cellbetong.

För basskikten i provinstallationen ersattes cementblandningen med cellbetong (densitet 700 kg/m³) med följande sammansättning:

- ✓ 550 kg/m³ cement
- ✓ 1,2 l/m³ skummedel
- ✓ 1,2 l/m³ vattenreducerande medel

För bärlagren i provinstallationen ersattes den obundna granulära blandningen med cellbetong

(densitet 400 kg/m³) med följande sammansättning:

- ✓ 330 kg/m³ cement
- ✓ 1,2 l/m³ skummedel
- ✓ 1,2 l/m³ vattenreducerande medel.

Under installationen togs prover från både bas- och grundskikten för att utföra tryck- och dragprovning, efter att ha låtit dem härda i 7 dagar.

Lagertester utfördes också med Light Weight Deflectometer på bärlagret som är tillverkat av C&D-avfall (figur 6).



Figur 6. Dynamiska lagertester

Resultaten anges i tabell 2, som innehåller medelvärdena för axeln, höger sida och vänster sida.

Tabell 2. Lättvikts deflektometervärden

Lättvikt deflektometer		
Provning nr	Evd (Mpa)	Position
1	64,84	Axel
2	40,46	Vänster
3	72,12	Axel
4	58,59	Höger sida
5	67,16	Axel

Den 18/04/2024 kördes 12 Fast-FWD deflektorstationer för sektion A och 12 Fast-FWD deflektorstationer för sektion B kontinuerligt.

Steget för varje station var 5 m, vilket gav totalt 57 m på sektion A och 54 m på sektion B.

Varje test upprepades med 3 progressivt större belastningar på 400, 600 och 800 kPa, vilket gav totalt 36 träffar på sektion A och 36 träffar på sektion B.

Figur 7 visar en översikt över den vägsträcka som innehåller provinstallationen.



Figur 7. Vägavsnitt som undersöks

Den sektion som undersöktes var uppdelad i två huvudlagerstrukturer med namnen A och B, som visas nedan i figur 8.

Lagerstruktur A användes för att analysera sektion A, medan lagerstruktur B användes för att analysera sektion B.

Stratigraphy A		Stratigrafi B	
	Cellular Concrete (700 Kg/m ³) 200 mm		Cellbetong (700 kg/m ³) 200 mm
	Cellular Concrete (400 Kg/m ³) 200 mm		C&D Avfall 200 mm
	C&D Waste 500 mm		C&D Avfall 500 mm
	Subbase		Anslutningsplatta

Figur 8. Lagerstrukturer för sektion A och sektion B.

2.1 Laboratorietester

Under läggningen av cellbetongen samlades flera prover in för att testa dess mekaniska egenskaper. För betong med en densitet på 400 kg/m³ togs 4 cylindriska prover för att bestämma dess indirekta draghållfasthet och 2 kubikprover togs för att analysera dess tryckhållfasthet.

För betong med en densitet på 700 kg/m³ togs på samma sätt 4 cylindriska prover för indirekt draghållfasthet och 2 kubikprover för tryckhållfasthet (figur 9, 10 och 11).



Figur 9. Provtagning



Figur 10. Provtagning



Figur 11. Provtagning

Testerna utfördes efter att proverna hade härdat i 7 dagar, och deras faktiska densitet beräknades också (figur 12, 13 och 14). Direkta drag- och 21-dagars tryckhållfasthetstester utfördes för endast två av proverna med en densitet på 700 kg/m³.



Figur 12. Test av indirekt draghållfasthet



Figur 13. Provfel under direkt draghållfasthetstestning



Figur 14. Provfel under tryckhållfasthetstestning

Resultaten redovisas i tabellerna 3 och 4.

Tabell 3. Resultat av direkt draghållfasthetsprovning

Prov	Vikt (kg)	Volym (m ³)	Dimensionerande densitet (kg/m ³)	Skiktets densitet (kg/m ³)	Indirekt draghållfasthet (MPa)	Härdning (d)
1	0.68	0.0014	400	469	0.09	7
2	0.52	0.0011	400	467	0.08	7
3	0.62	0.0013	400	460	0.08	7
4	0.68	0.0013	400	514	0.11	7
5	1.23	0.0015	700	845	0.39	7
6	1.25	0.0015	700	853	0.40	7
7	1.22	0.0015	700	834	0.39	7
8	1.24	0.0015	700	851	0.53	21

Tabell 4. Resultat av provning av tryckhållfasthet

Prov	Vikt (kg)	Volym W	Dimensionerande densitet (kg/m ³)	Skiktets densitet (kg/m ³)	Tryckhållfasthet (MPa)	Härdning (d)
1 400D	1.490	3.21	400	464	0.64	7
2 400D	1.570	3.31	400	475	0.58	7
3 700D	2.800	3.31	700	846	3.92	7
4 700D	2.728	3.36	700	808	3.99	21

Ytterligare ett ultraljudstest utfördes för att utvärdera elasticitetsmodulen (figur 15). Den genomsnittliga elasticitetsmodulen som uppmättes för de analyserade proverna var 1000 MPa.



Figur 15. Exempel på ett prov som analyserats med ultraljudstestning

2.2 Tester på plats: Deflektometer för snabb fallande vikt (Fast-FWD)

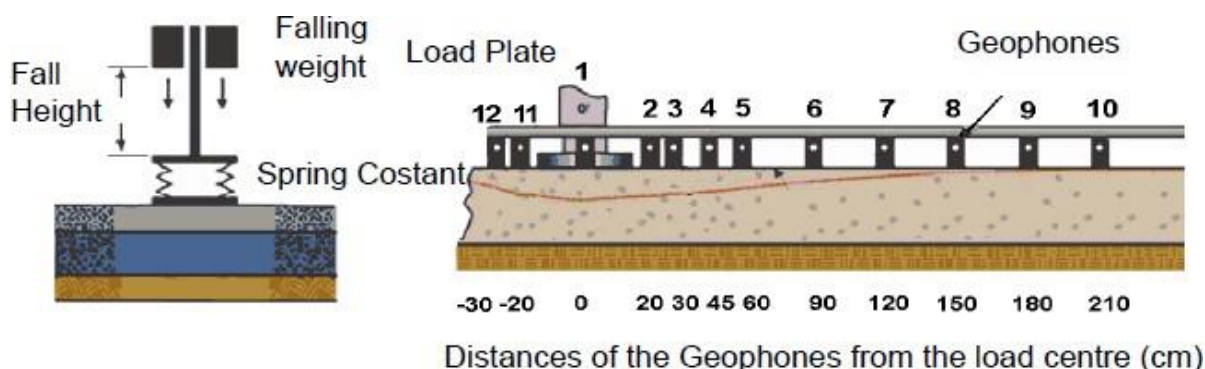
Fast-FWD-testning utfördes efter en 7-dagars initial härdningsperiod efter provinstallationen. Instrumentet kan utföra ett statistiskt signifikant antal mätningar på relativt kort tid och kan därför ge information om det strukturella tillståndet för hela den asfalterade ytan. Det helt elektroniska instrumentet är utformat för att ge en noggrant kontrollerad pulsbelastning på beläggningsytan för att simulera den belastning som produceras av ett fordon i rörelse.

På grund av de metoder som används för att utföra testningen faller Fast-FWD inom kategorin utrustning som kallas Impact Load Device, vilket innebär ett instrument som utvärderar reaktionerna hos ett föremål, t.ex. en vägbeläggning, genom att applicera en pulsbelastning som skapas genom att släppa en vikt med kända egenskaper.

Instrumentet har speciella sensorer (geofoner) för att registrera avböjningen, det vill säga en tillfällig vertikal deformation, av ytan som undersöks. Den speciella placeringen av geofonerna i förhållande till tyngdens slagcentrum gör det möjligt att mäta nedböjningen av olika punkter på ytan på olika avstånd från lastens centrum. Detta kan användas för att utvärdera en avböjningsbassäng. Noggranna och komplexa backberäkningsmodeller kan användas för att analysera formen och egenskaperna hos avböjningsbassängen för att bestämma egenskaperna hos de nedre lagren, inklusive materialens styvhet. I det specifika fallet med Fast-FWD som används för denna undersökning mäts belastningen som genereras av den sinusformade pulsen med en total varaktighet på 30 millisekunder av en lastcell med en upplösning på 0,1 kPa, och beläggningen

Responsten registreras var 0,01 millisekund av 12 avböjningssensorer med en upplösning på 0,1 μm . För att applicera önskad puls kan viktens fallhöjd justeras för att skapa spänningar, och därmed avböjningar, av olika storlek.

Figur 16 visar schematiskt hur Fast-FWD-instrumentet fungerar: lastkropp som består av en vikt och en viktguide.



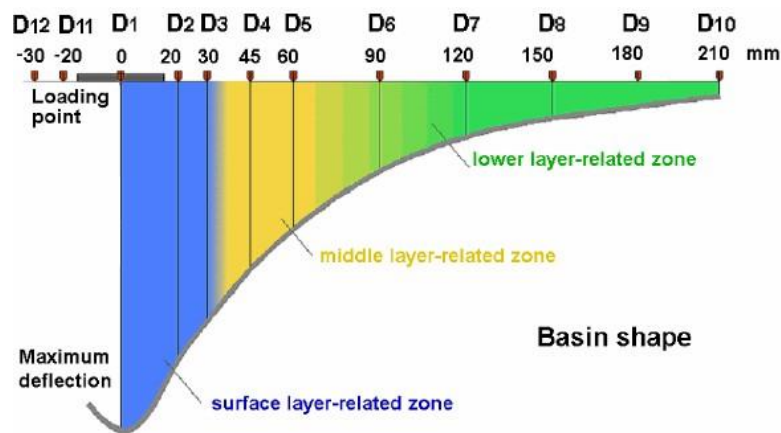
Figur 16. Fast-FWD schematiskt diagram - lastmetod och geofonarrangemang



Figur 17. Lastplatta och avböjningssensorer monterade på sensorstången

Figur 17 visar också det klassiska geofonarrangemanget, där de är placerade i en enda linje med en i mitten av lastområdet och de återstående 12 utanför det. Detta arrangemang kan användas för att identifiera den tidigare nämnda avböjningsbassängen som skapas när vikten faller på beläggningen. Det upprepas i allmänhet 3 gånger, med möjlighet att ändra fallhöjden och därmed intensiteten på pulsbelastningen.

Instrumentet kan ge en maxpuls på 1700 kPa, vilket motsvarar en belastning på 12,0 ton. Lasten appliceras på ett cirkulärt lastområde med en diameter på 30 cm med hjälp av en segmenterad platta med ett lager av flexibelt material som hjälper den att fästa vid ytan och fördela lastspänningen jämnt. Lasten motsvarar ungefär två gånger det högsta tillåtna värdet på ett hjul enligt den nya italienska väglagen (NCdS), som anger 12 ton på en axel med dubbla hjul (6 ton vardera). Vertikala deformationer mäts med hjälp av tillräckligt många sensorer för att på ett adekvat sätt beskriva den avböjningsbassäng som skapas av pulsen, som visas i figur 18.



Figur 18. Diagram över avböjningsbassängen som visar de områden som påverkas av de olika lagren

Geofonerna är lämpligt placerade från varandra, beroende på ytans totala styvhet. Avböjningsbassängen rekonstrueras genom att kombinera de geofona topparna, och följande analyseras från bassängen:

1. Deformationen i mitten av lastplattan, som motsvarar den maximala deformationen av den analyserade strukturen och ger en indikation på styvheten hos hela skiktstrukturen under karosseristommen.
2. bassängens lutning, dvs. skillnaden mellan avböjningarna av två geofoner i förhållande till deras avstånd;
3. Skillnaden mellan utböjningarna i den ursprungliga delen av avböjningsbassängen (från 0 mm till 200 mm eller 300 mm från plattans mittpunkt, kallad IS200 respektive IS300) ger en indikation på den relativa styvheten hos den underliggande ytan av den undersökta konstruktionen, vilket är en approximation för bitumenbundna flexibla beläggningar.
4. Skillnaden mellan nedböjningarna i den centrala delen av avböjningsbassängen (från 300 mm till 900 mm från plattans mittpunkt, kallad IS600) ger en indikation på den relativa styvheten hos den mittersta delen av den undersökta konstruktionen, som i allmänhet är förstärkningslagret och grundlagren.
5. nedböjningarna vid den djupaste delen av bassängen, över 900 mm, vilket är relaterat till förstärkningsplattans styvhet och kallas IS900.

En ovanlig egenskap hos instrumentet är dess förmåga att använda backberäkningstekniker för att härleda styvheten hos de underliggande materialen.

Deflektometerdata efterbehandlas med finita elementberäkningsprogrammet ELMOD som implementeras av tillverkaren av DYNATEST-instrumentet. Bakåtbärkning är den process som används för att beräkna elasticitetsmodulerna för komponentskikten och styvheten hos förstärkningsplattan från avböjningsbassängen som skapas av en fallviktsdeflektometer. För att utföra backberäkningsprocessen fastställs en initial nominell styvhet för materialen och förfinas sedan genom successiva iterationer. Syftet är att minimera skillnaderna

mellan kombinationerna av styvhet och tjocklek och resultaten av deflektometermätningarna.

2.3 Beskrivning av den programvara som används för att utvärdera modulerna

Efterbehandlingsprogrammet som användes för att utvärdera lagrens moduler med hjälp av backberäkningsmetoden var DYNATEST ELMOD.

Bakåtberäkning är den process som används för att beräkna elasticitetsmodulerna för beläggnings komponentskikt och elasticitetsmodulen för bärplattan från avböjningsbassängen som skapas av en fallviktsdeflektometer. För att utföra backberäkningsprocessen måste initiala elasticitetsmoduler ställas in för karosseristommens komponentlager, vilka i allmänhet är baserade på erfarenhet. Efter att ha antagit den initiala modulen för tjockleken utvärderas beläggnings ytavböjning med hjälp av en ad hoc-responsmodell. Den beräknade nedböjningen jämförs sedan med den uppmätta nedböjningen. Genom att justera elasticitetsmodulen för beläggnings komponentskikt är det möjligt att få en bra matchning mellan de uppmätta och teoretiska nedböjningarna. Efterberäkningsprocessen är vanligtvis iterativ.

De viktigaste komponenterna i efterräkningsprocessen inkluderar:

- Tjocklek på komponentskikt och belastningar som appliceras: tjocklek vid varje punkt där provningen utfördes och belastningsnivå som applicerats på den belagda ytan.
- uppmätta deformationer: ytavböjningar som förvärvats under FWD-mätningarna;
- temperaturen under provningen.
- komponentlagertyper (för att ställa in den initiala modulen, känd som "seed moduli");
- beräkning av avböjning: beläggningsresponsmodell för att beräkna den teoretiska ytavböjningen;
- Felbedömning: Jämförelse mellan de beräknade och uppmätta deformationerna.
- Sök efter nya moduler: iterativ sökning efter nya beläggningslagermoduler tills de beräknade och uppmätta nedböjningarna inte skiljer sig åt med mer än en viss gräns;
- Modulvariationskontroll: Backcalculation-programmet kan vanligtvis definiera ett intervall av moduler för varje beläggningsstyp för att förhindra att den beräknar orimliga modulvärden.

Faktorer som påverkar denna process är bland annat:

- Strukturerad beläggning;
- lastvärde;
- temperatur (särskilt i flexibla trottoarer);
- under den säsong under vilken mätningarna görs.

Överbyggnadens struktur är en av de aspekter som har störst inverkan på avböjningsbassängen. För samma belastning avböjer en överbyggnad som är mindre tjock och gjord av dåliga material mycket mer än en med hög bärförmåga, och formen på den resulterande avböjningsbassängen är relaterad till individens styrka

lager och deras ömsesidiga interaktion.

Den applicerade belastningen är en av de kritiska faktorerna när mätningarna görs. I synnerhet skall de belastningar som karosseristommen utsätts för vara så lika de som möjligt kommer att utsättas för dem när den är i drift. Detta säkerställer att det inducerade drag-deformationstillståndet kommer att likna det verkliga tillståndet och, efter bakräkningsprocesserna, kommer de deformationer som beräknas vid basen av det bundna lagret också att vara så nära den verkliga situationen som möjligt. Dessutom, eftersom överbyggnadsmaterialen kan uppvisa icke-linjärt beteende, kan användning av orealistiska belastningsnivåer minska mätfehlen med mängder som inte är proportionella mot de faktiska minskningarna som upplevs under drift när tunga laster passerar. Temperaturen på de bundna skikten är en annan faktor som mest påverkar materialets beteende när en belastning appliceras. Det mått som påverkas mest av temperaturen är det under mitten av lastområdet, eftersom det är det som är direkt beroende av styvheten hos de bundna lagren, medan nedböjningen som mäts av den geofon som ligger längst bort, som registrerar bärplattans beteende, knappast påverkas.

Den sista kritiska faktorn som måste beaktas när man gör deflektometermätningarna är klimatsäsongen under vilken testerna utförs. Denna faktor är särskilt viktig för de djupare lagren, och i synnerhet för förstärkningsplattan. Faktum är att detta kan vara föremål för frost- och upptyningscykler under vintern, vilket kan ändra de mätningar som görs. I allmänhet är de föredragna perioderna för att göra mätningar varma perioder där lagren är mättade och de registrerade avböjningarna är maximala.

2.4 Analys av resultaten

2.4.1 Beskrivning av analysmetoden

Deflektometerdata tolkas med hjälp av olika typer av analys. I synnerhet kan specifika index som kallas *Basin Indexes* erhållas från de rådata som samlas in av instrumentet, vilket kan ge en initial indikation på både de övre och nedre lagren av överbyggnaden. Data från den centrala geofonen kan också användas för att få en indikation på det mekaniska beteendet hos hela överbyggnaden. Detta görs genom att homogenisera skikten ner till bärplattan och lösa de Boussinska ekvationerna för den nedåtriktade avböjningen för att erhålla den homogeniserade elasticitetsmodulen.

Slutligen kan backberäkningstekniker tillämpas på tjockleksdata för överbyggnaden för att få data relaterade till de mekaniska egenskaperna och elasticitetsmodulerna för de enskilda lagren.

I det här fallet, på begäran av den uppdragande parten, utfördes en retroaktiv beräkning för att verifiera den mekaniska prestandan hos de bituminösa betongskikten, sedan beräknades modulerna för de enskilda skikten som utgör beläggningen med hjälp av programvaran ELMOD 6 för att hitta elasticitetsmodulen för ytskikten.

2.4.2 Indata som används för utfallsberäkning

Elasticitetsmodulerna för beläggningslagren beräknades utifrån de mätningar som gjordes genom backcalculation. Två lagerstrukturer identifierades: lagerstruktur A och lagerstruktur B, vilka användes som indata för Elmod-programvaran (Figur 19).

Stratigrafi A			Stratigrafi B		
	Cellbetong (700 kg/m ³) 200 mm	Skikt Modul E1		Cellbetong (700 kg/m ³) 200 mm	Skikt Modul E1
	Cellbetong (400 kg/m ³) 200 mm	Skikt Modul E2		C&D Avfall 200 mm	Skikt Modul E2
	C&D Avfall 500 mm	Skikt Modul E3		C&D Avfall 500 mm	Skikt Modul E3
	Anslutningsplatta	Skikt Modul Esub		Anslutningsplatta	Skikt Modul Esub

Figur 19. Lagerstruktur för de analyserade sektionerna

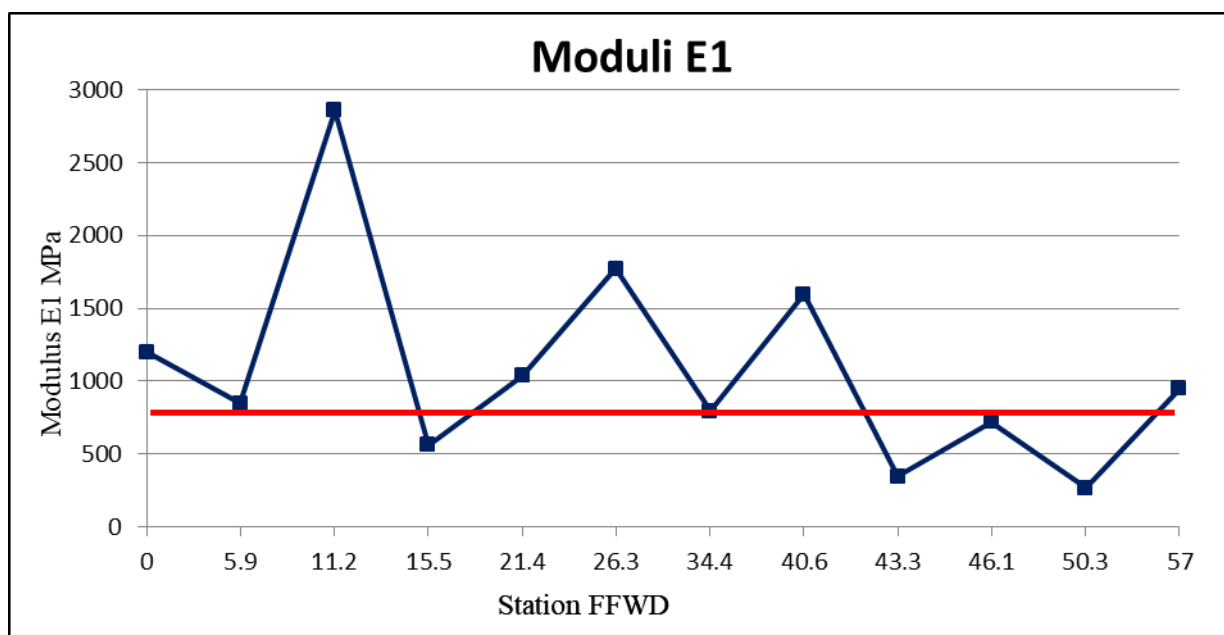
Modulerna för det cellulära betonglagret (densitet 700 kg/m³) E1, det andra cellbetongskiktet (densitet 400 kg/m³) E2, bygg- och rivningsavfallsskiktet E3 och bärlagret Esub beräknades för skiktstruktur A.

Tabell 5 ger riktlinjer för tolkning av värdena för modulerna dividerat med lagertyp i förhållande till den provvägssträcka där lagerstruktur A användes.

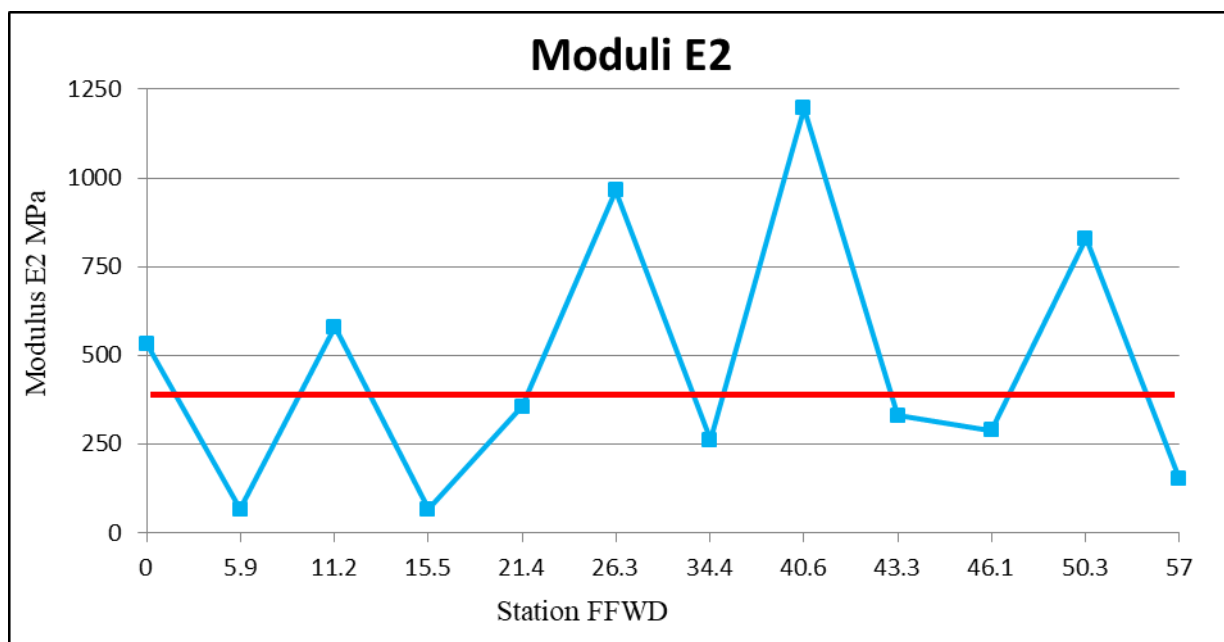
Tabell 5. Referensparametrar för lagerstrukturen i avsnitt A.

Lagerstruktur	Referens parametrar
Skikt 1 Modul E1	Tillfredsställande > 700 MPa
Skikt 2 Modul E2	Tillfredsställande > 300 MPa
Skikt 3 Modul E3	Tillfredsställande > 60 MPa
Skikt 4 Modul Esub	Tillfredsställande > 30 MPa

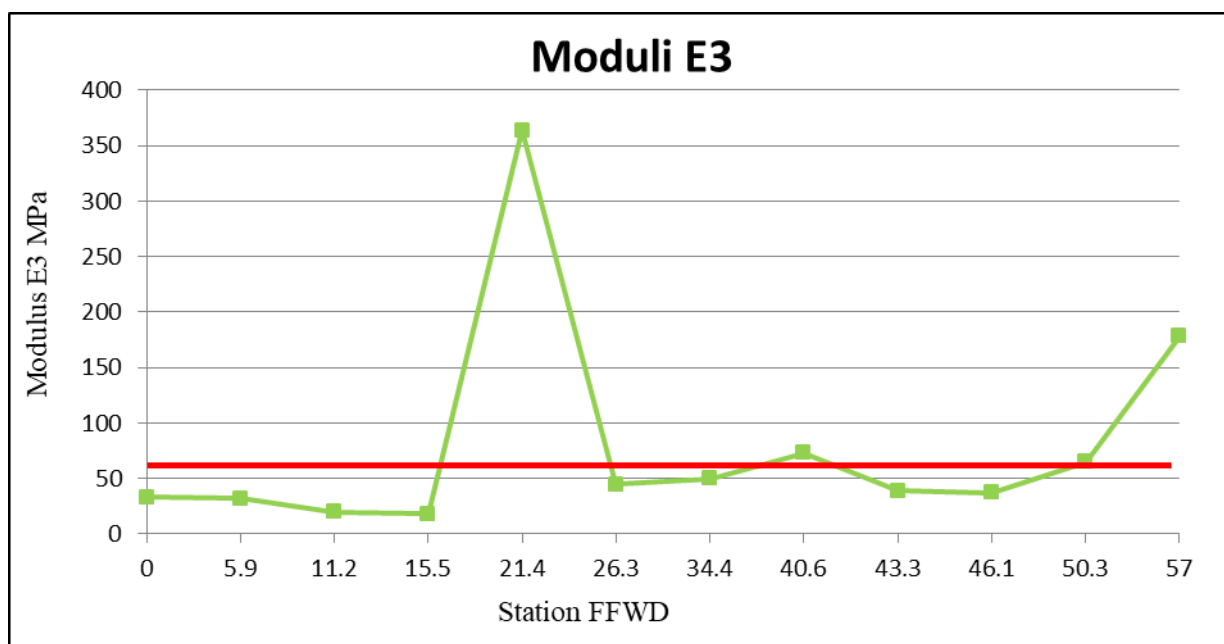
Värdena för modulerna E1, E2, E3 och Esub för lagerstruktur A som används på provvägssträckan anges nedan (figur 20, 21, 22 och 23). Det bör noteras att det vid stationerna 43.3, 46.1 och 50.3 fanns sprickbildning där provningen utfördes. Data som rör typiska värden som anses vara bra har också inkluderats för att göra diagrammen lättare att läsa.



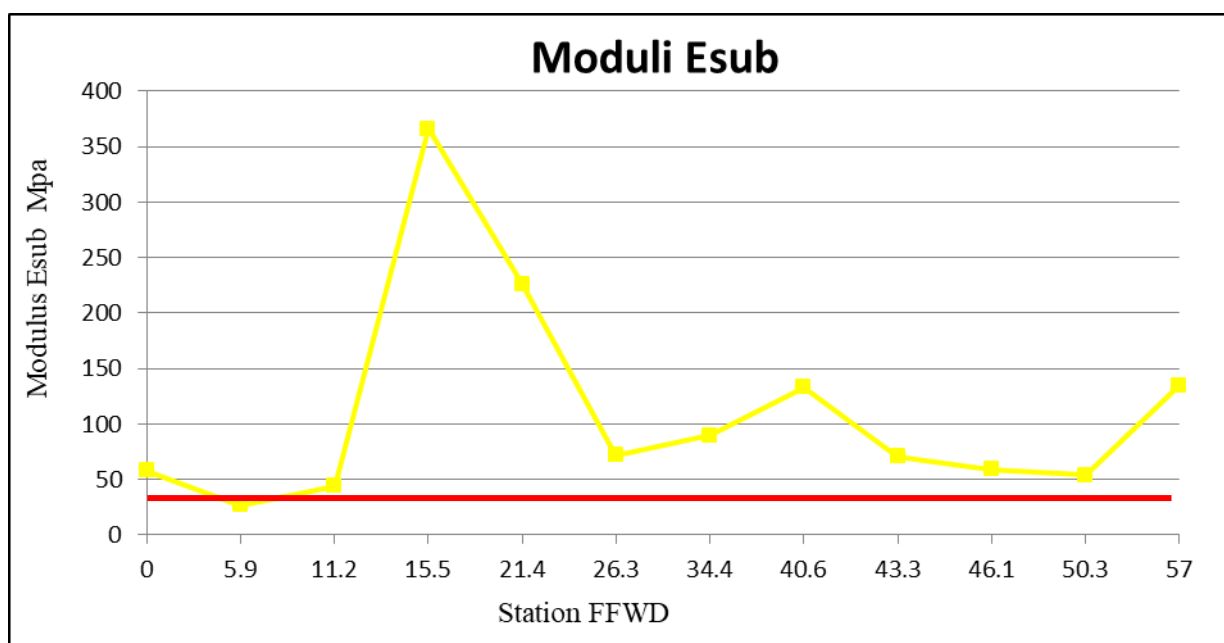
Figur 20. Modul E1 trend för lagerstrukturen i sektion A



Figur 21. Modul E2-trend för lagerstrukturen i sektion A



Figur 22. Modul E3-trend för lagerstrukturen i sektion A.



Figur 23. Modul Esub-trend för lagerstrukturen i sektion A.

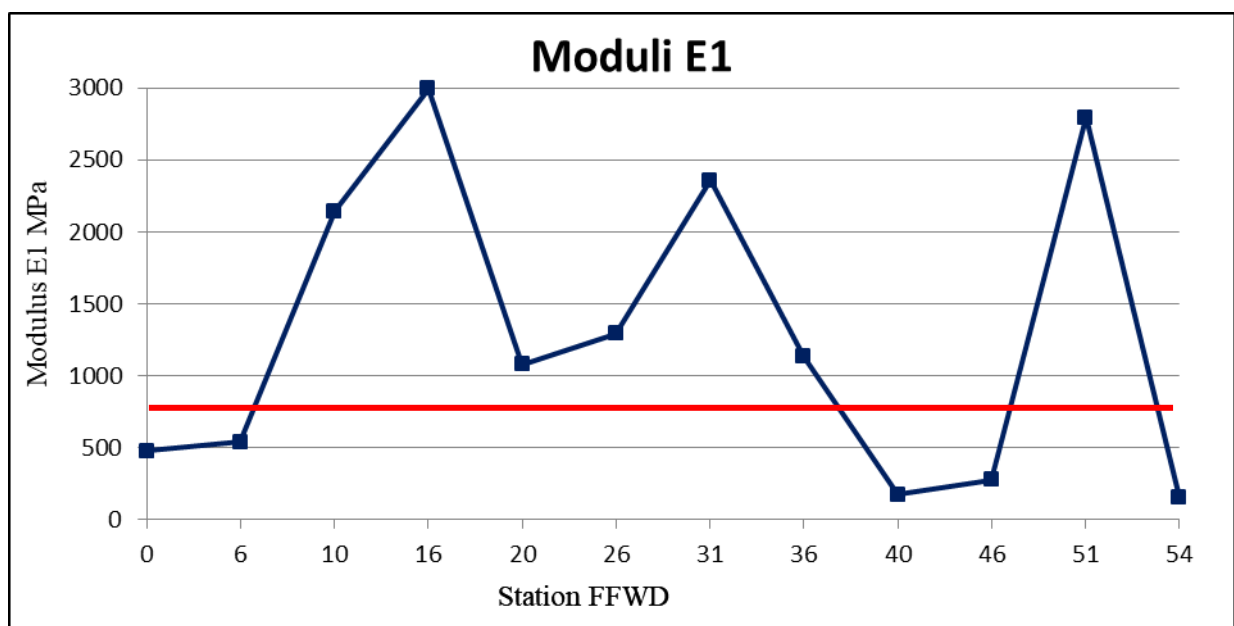
Modulerna för cellbetongskiktet (densitet 700 kg/m³) **E1**, bygg- och rivningsavfallsskiktet **E2**, bygg- och rivningsavfallsskiktet **E3** och bärlagret **Esub** beräknades för lagerstruktur B. Det bör noteras att det vid stationerna 5.5, 40.4 och 54.1 förekom sprickbildning där provningen utfördes.

Tabell 6 ger riktlinjer för tolkning av värdena för modulerna dividerat med lagertyp i förhållande till provvägsavsnittet där lagerstruktur B användes.

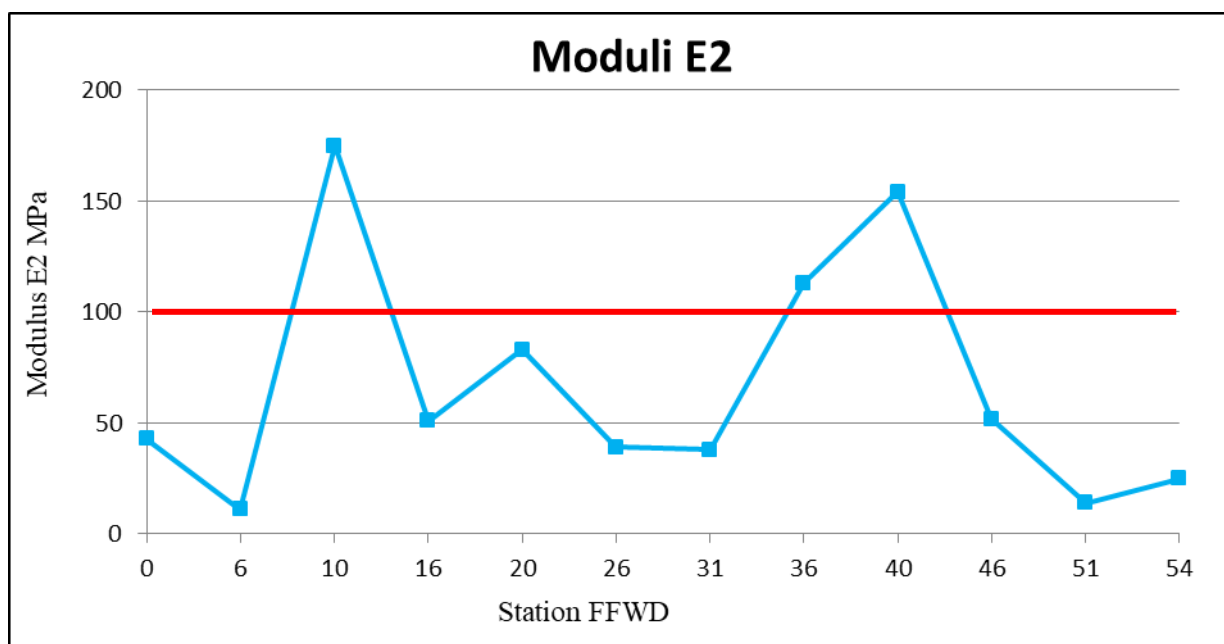
Tabell 6. Referensparametrar för lagerstrukturen i sektion B

Lagerstruktur	Referens parametrar
Skikt 1 Modul E1	Tillfredsställande > 700 MPa
Skikt 2 Modul E2	Tillfredsställande > 100 MPa
Skikt 3 Modul E3	Tillfredsställande > 60 MPa
Skikt 4 Modul Esub	Tillfredsställande > 30 MPa

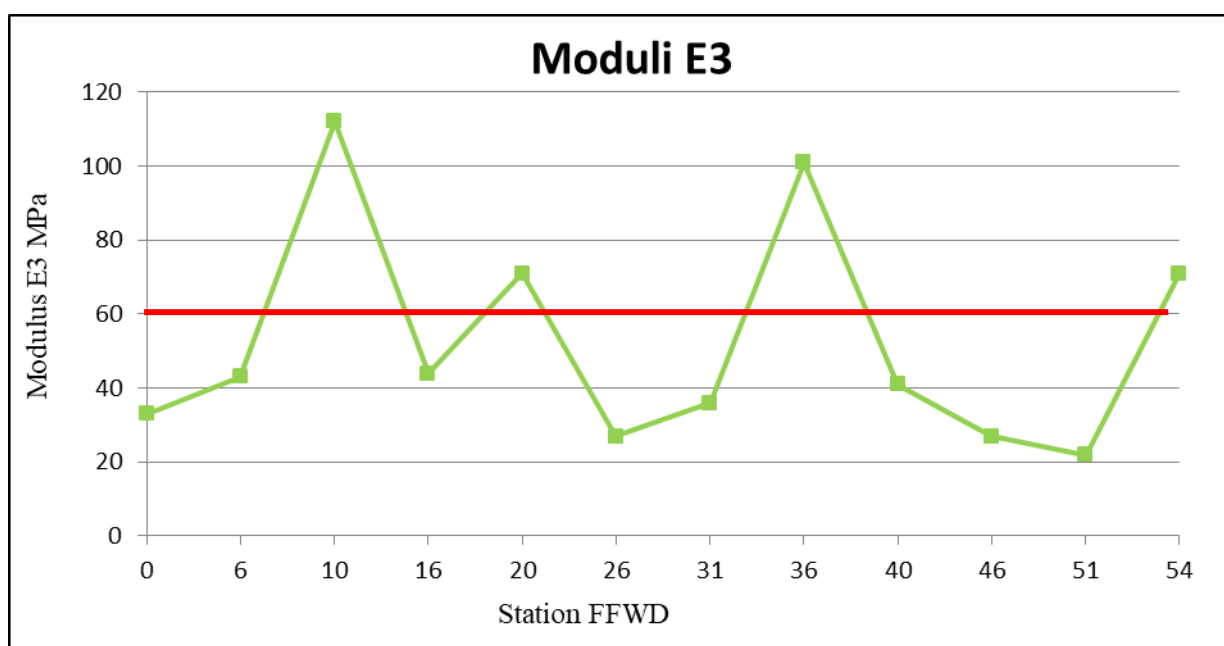
Värdena för modulerna E1, E2, E3 och Esub som hänför sig till lagerstrukturen i sektion B anges nedan (figurerna 24, 25, 26 och 27).



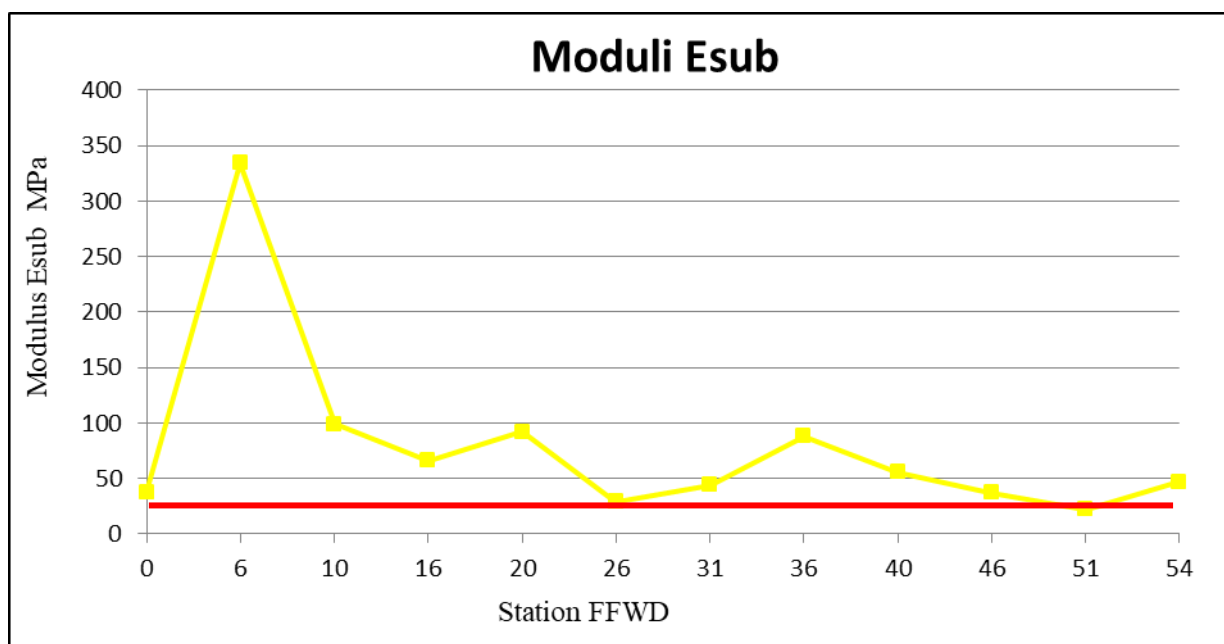
Figur 24. Modul E1 trend för lagerstrukturen i sektion B.



Figur 25. Modul E2-trend för lagerstrukturen i sektion B.



Figur 26. Modul E3-trend för lagerstrukturen i sektion B.



Figur 27. Modul Esub-trend för lagerstrukturen i sektion B.

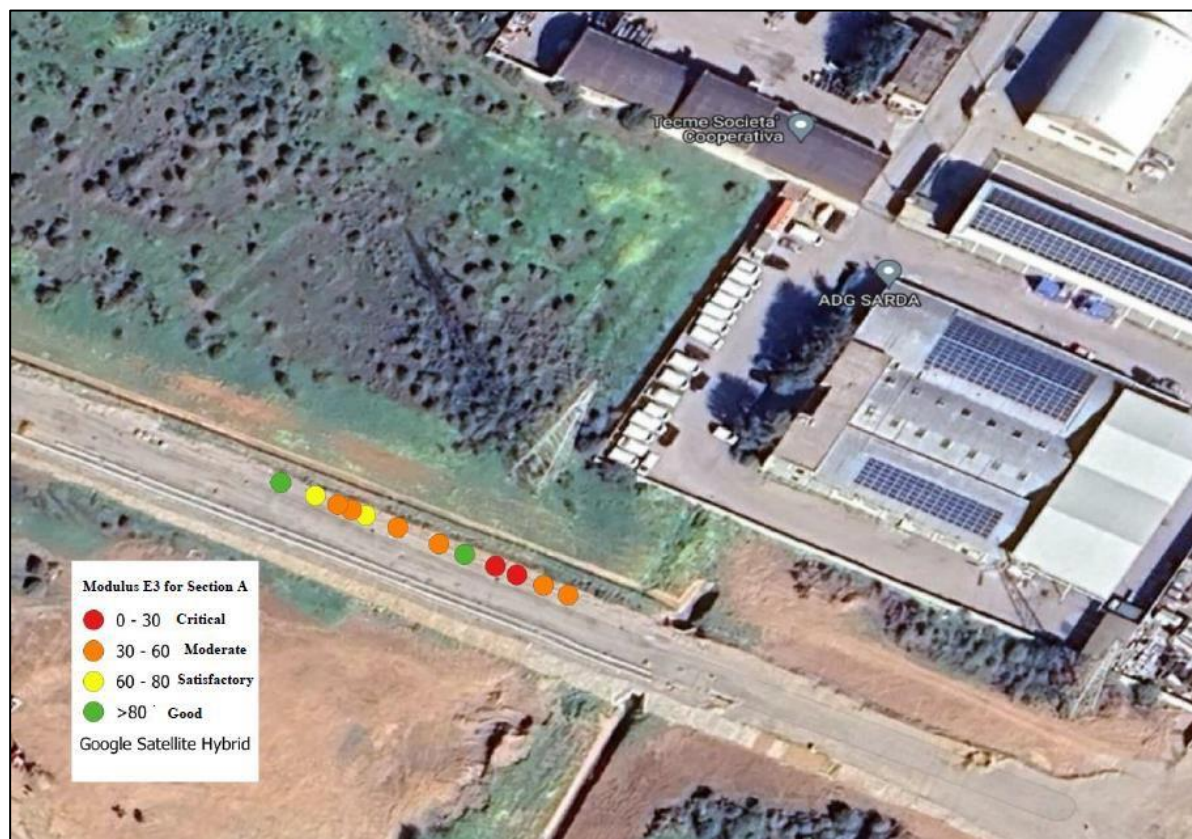
Värdena för moduli E1 (cellbetong med en densitet på 700 kg/m³), E2 (cellbetong med en densitet på 400 kg/m³), E3 (lager av bygg- och rivningsavfall) och Esub (förstärkningslager) för försökssektion A, och moduli E1 (betong med en densitet på 700 kg/m³), E2 (skikt av bygg- och rivningsavfall), E3 (lager av bygg- och rivningsavfall) och Esub (förstärkningslager) för försökssektion B anges nedan, uppdelade enligt de värden som beräknats med hjälp av retroaktiv beräkning och geolokaliserade på Qgis (figur 28 till 35).



Figur 28. Modul E1 för lagerstrukturen i sektion A



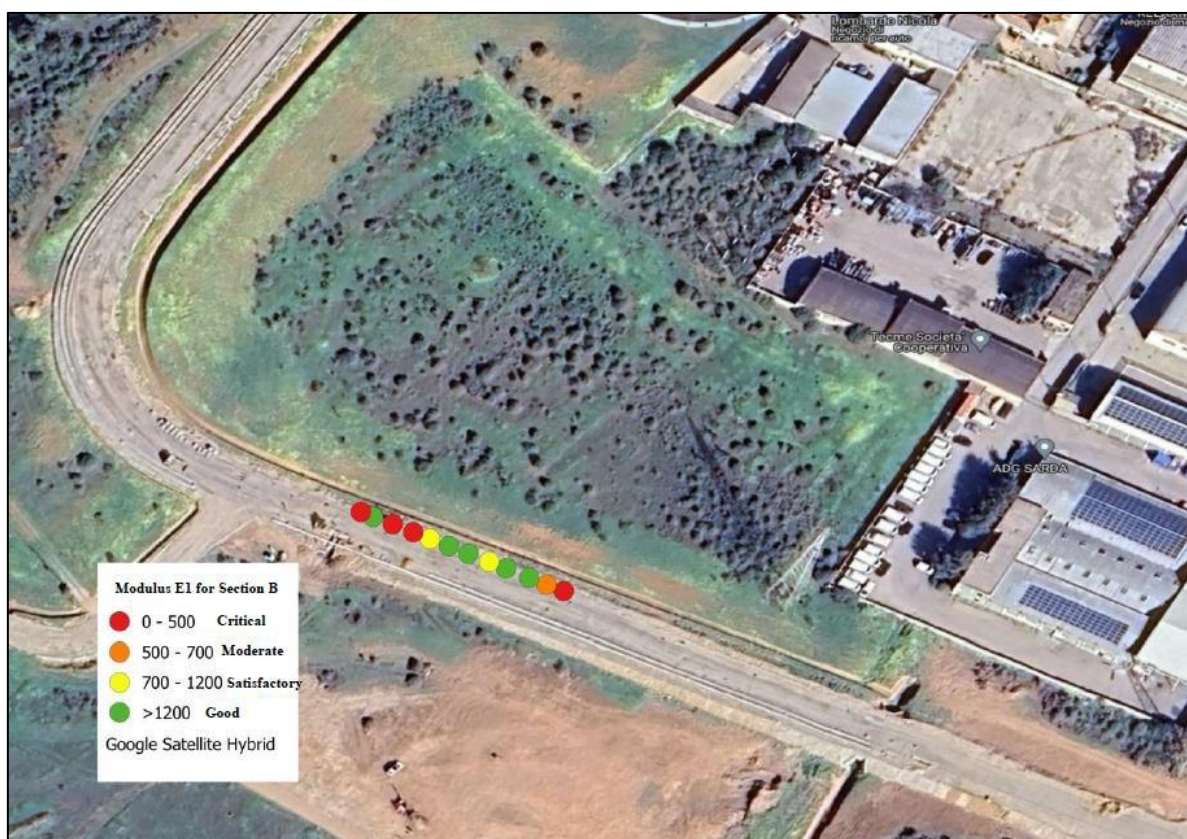
Figur 29. Modul E2 för lagerstrukturen i sektion A



Figur 30. Modul E3 för lagerstrukturen i sektion A



Figur 31. Modul Esub för lagerstrukturen i sektion A



Figur 32. Modul E1 för lagerstrukturen i sektion B



Figur 33. Modul E2 för lagerstrukturen i sektion B



Figur 34. Modul E3 för lagerstrukturen i sektion B



Figur 35. Modul Esub för lagerstrukturen i sektion B

Genom att undersöka trenderna för de två försökssträckorna av vägen kan man se att tillfredsställande värden registrerades i både sektion A och sektion B för modul E1 av baslagret av cellbetong med en densitet på 700 kg/m^3 . När det gäller grundlagren användes cellbetong (densitet 400 kg/m^3) i sektion A, medan bygg- och rivningsavfall användes i sektion B. Fluktuerande resultat hittades i sektion A, troligen på grund av begränsad härdning, medan goda resultat kan observeras för bygg- och rivningsavfall i sektion B. Goda resultat erhöles för modul E3 (bärlager) och modul Esub (naturligt lager).

Testerna med Fast Falling Weight Deflectometer upprepades efter 28 dagar.

12 Fast-FWD-deflektorstationer för sektion A och 11 Fast-FWD-deflektorstationer för sektion B kördes kontinuerligt.

Steget för varje station var 5 m, vilket gav totalt 60 m på sektion A och 51 m på sektion B.

Varje test upprepades med 3 progressivt större belastningar på 400, 600 och 800 kPa, vilket gav totalt 36 träffar på sektion A och 33 träffar på sektion B.

Elasticitetsmodulerna för beläggningslagren beräknades utifrån de mätningar som gjordes med hjälp av backcalculation.

Modulerna för det cellulära betonglagret (densitet 700 kg/m³) **E1**, det andra cellbetongskiktet (densitet 400 kg/m³) **E2**, bygg- och rivningsavfallsskiktet **E3** och bärlagret **Esub** beräknades för skiktstruktur A.

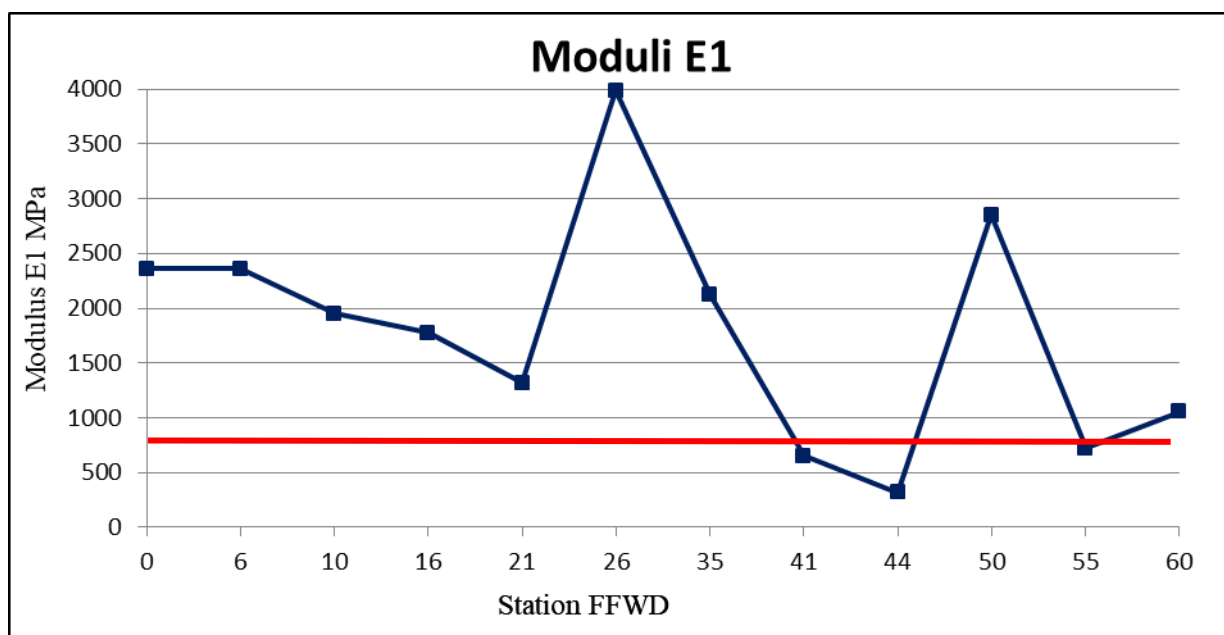
Tabell 5 ger riktlinjer för tolkning av värdena för modulerna dividerat med lagertyp i förhållande till den provvägssträcka där lagerstruktur A användes.

Tabell 7 ger riktlinjer för tolkning av värdena för modulerna dividerat med lagertyp i förhållande till den provvägssträcka där lagerstruktur A användes.

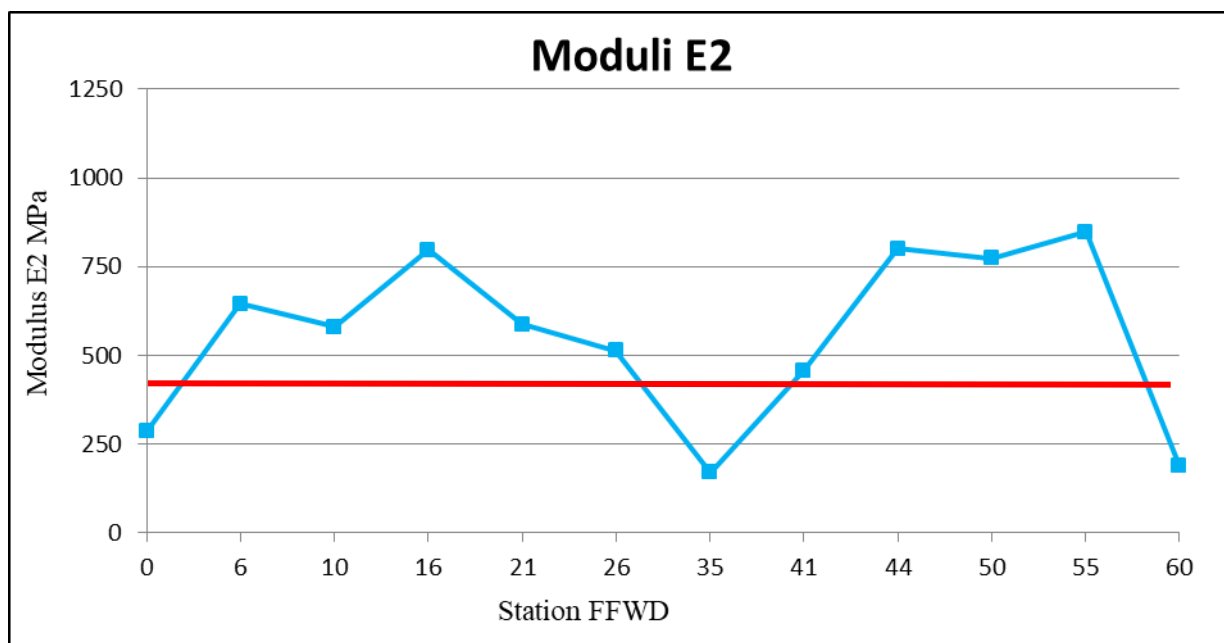
Tabell 7. Referensparametrar för lagerstrukturen i avsnitt A

Lagerstruktur	Referens parametrar
Skikt 1 Modul E1	Tillfredsställande > 700 MPa
Skikt 2 Modul E2	Tillfredsställande > 300 MPa
Skikt 3 Modul E3	Tillfredsställande > 60 MPa
Skikt 4 Modul Esub	Tillfredsställande > 30 MPa

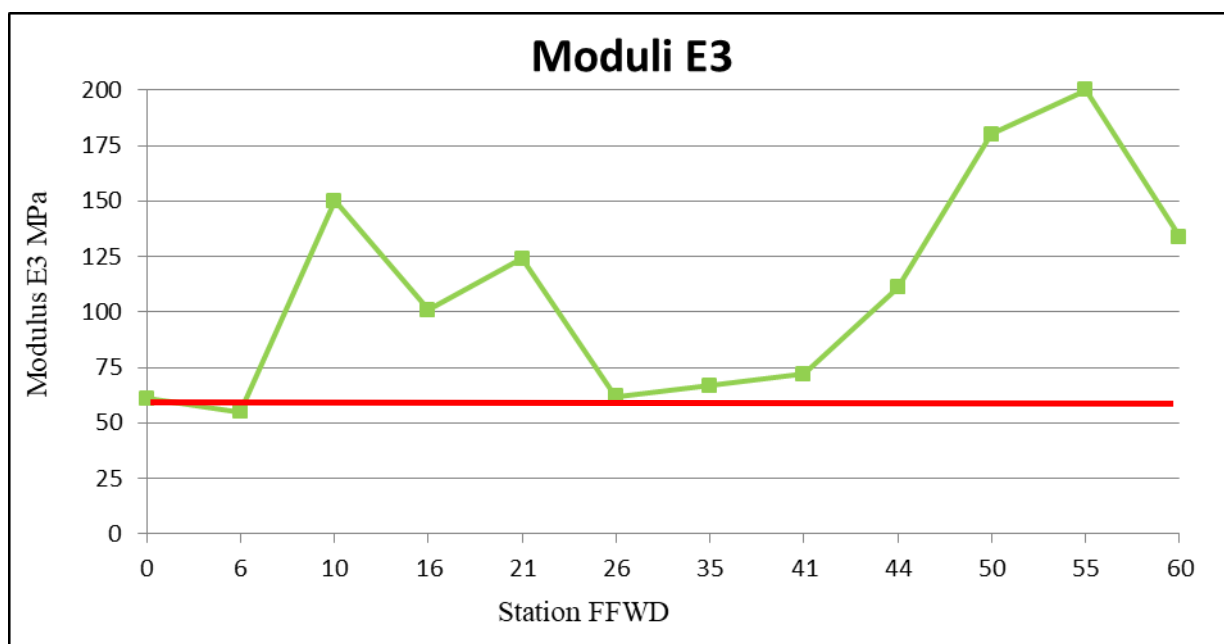
Värdena för modulerna E1, E2, E3 och Esub som hänför sig till lagerstrukturen i sektion A anges nedan (figurerna 36, 37, 38 och 39).



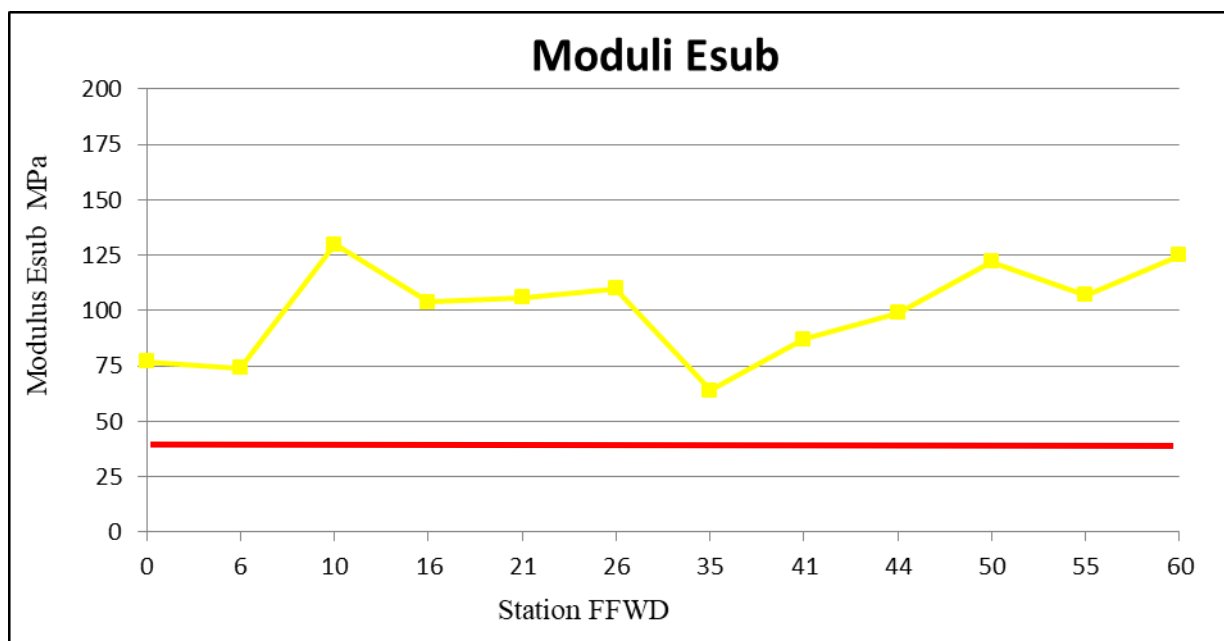
Figur 36. Modul E1-trend för lagerstrukturen i sektion A.



Figur 37. Modul E2-trend för lagerstrukturen i sektion A.



Figur 38. Modul E3-trend för lagerstrukturen i sektion A.



Figur 39. Modul Esub-trend för lagerstrukturen i sektion A.

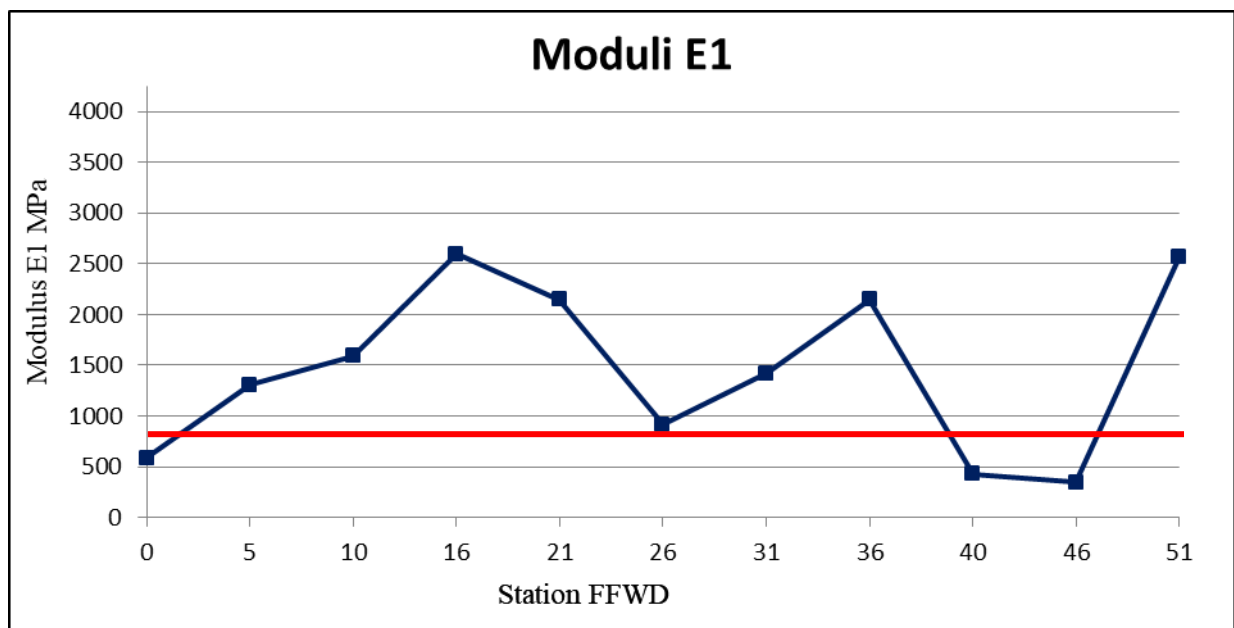
Modulerna för cellbetongskiktet (densitet 700 kg/m³) **E1**, bygg- och rivningsavfallsskiktet **E2**, bygg- och rivningsavfallsskiktet **E3** och bärlagret **Esub** beräknades för lagerstruktur B.

Tabell 8 ger riktlinjer för tolkning av värdena för modulerna dividerat med lagertyp i förhållande till den provvägssträcka där lagerstruktur B användes.

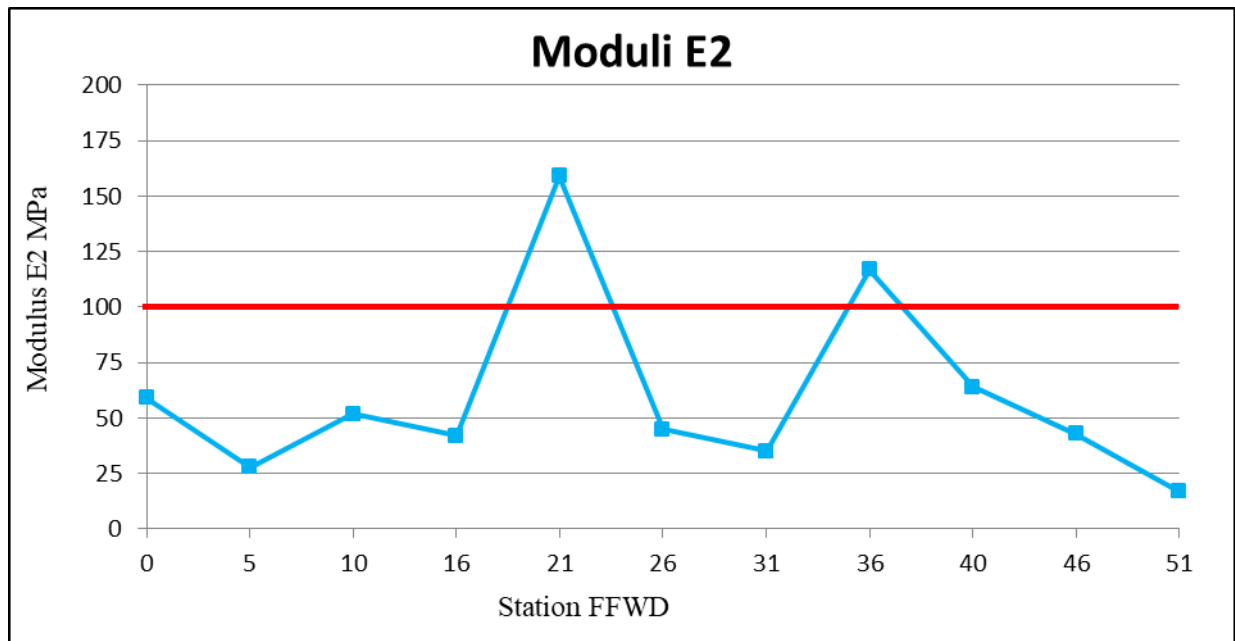
Tabell 8. Referensparametrar för lagerstrukturen i sektion B

Lagerstruktur	Referens parametrar
Skikt 1 Modul E1	Tillfredsställande > 700 MPa
Skikt 2 Modul E2	Tillfredsställande > 100 MPa
Skikt 3 Modul E3	Tillfredsställande > 60 MPa
Skikt 4 Modul Esub	Tillfredsställande > 30 MPa

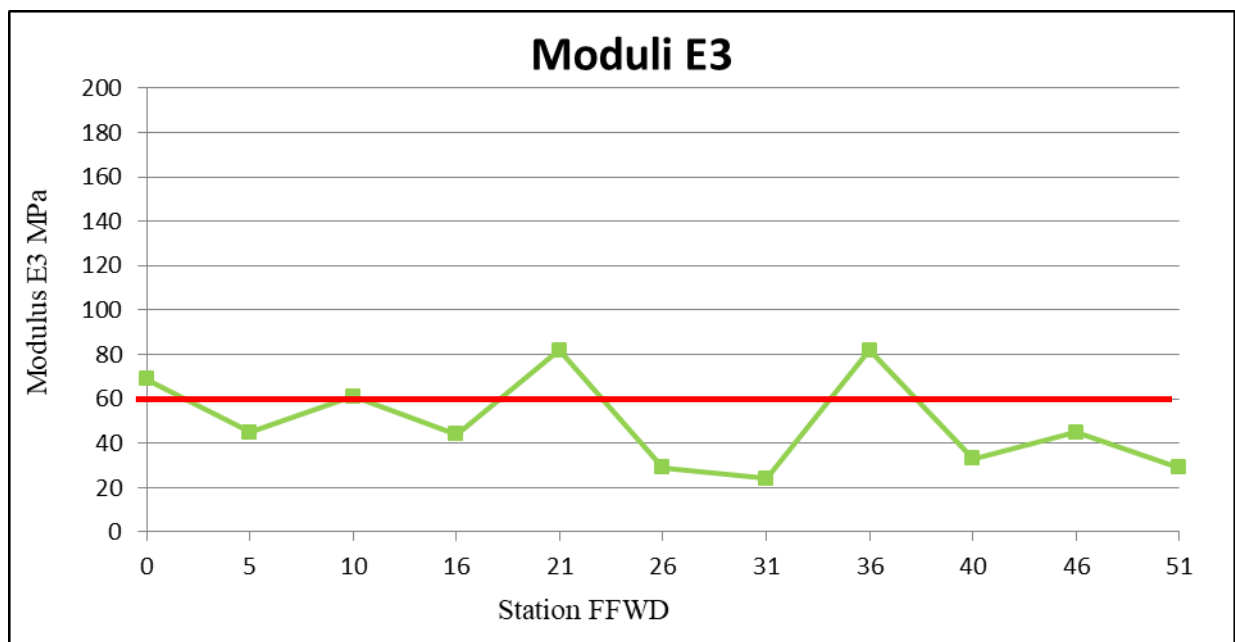
Värdena för modulerna E1, E2, E3 och Esub som hänför sig till lagerstrukturen i sektion B anges nedan (figur 40, 41, 42 och 43).



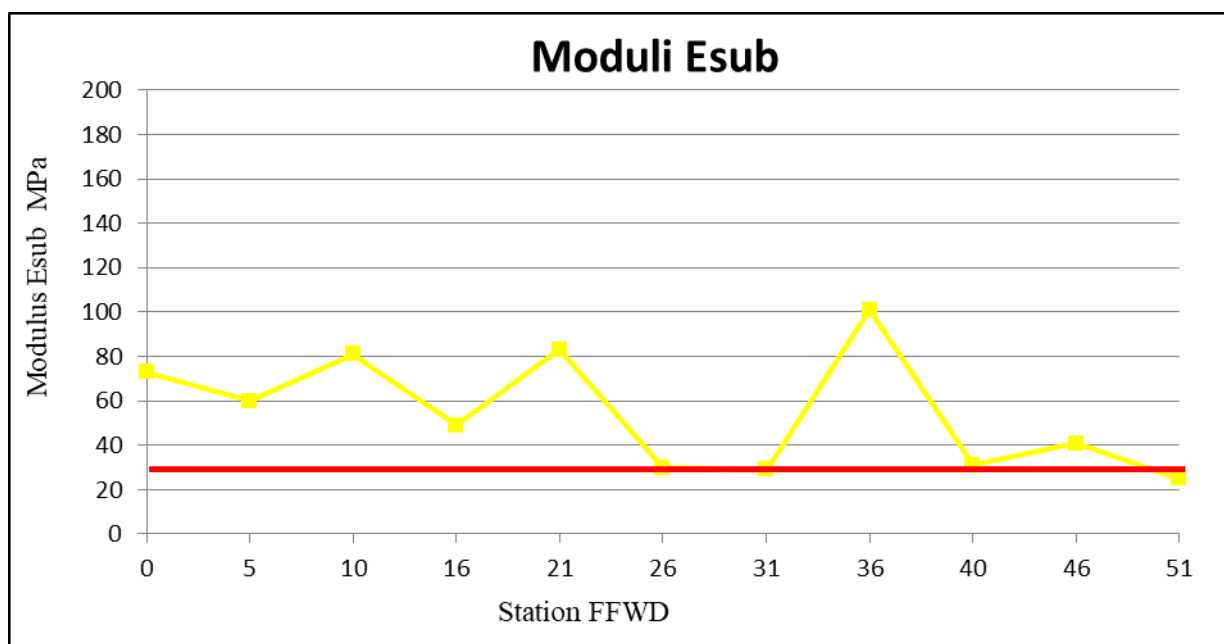
Figur 40. Modul E1 trend för lagerstrukturen i sektion B.



Figur 41. Modul E2-trend för lagerstrukturen i sektion B.



Figur 42. Modul E3-trend för lagerstrukturen i sektion B.



Figur 43. Modul Esub-trend för lagerstrukturen i sektion B

Värdena för moduli **E1** (cellbetong med en densitet på 700 kg/m³), **E2** (cellbetong med en densitet på 400 kg/m³), **E3** (lager av bygg- och rivningsavfall) och **Esub** (förstärkningslager) för försökssektion A, och moduli **E1** (betong med en densitet på 700 kg/m³), **E2** (skikt av bygg- och rivningsavfall), **E3** (lager av bygg- och rivningsavfall) och **Esub** (förstärkningslager) för försökssektion B anges nedan, uppdelade enligt de värden som beräknats med hjälp av retroaktiv beräkning och geolokaliserade på Qgis (figur 44 till 51).



Figur 44. Modul E1 för lagerstrukturen i sektion A.



Figur 45. Modul E2 för lagerstrukturen i sektion A.



Figur 46. Modul E3 för lagerstrukturen i sektion A.



Figur 47. Modul Esub för lagerstrukturen i sektion A.



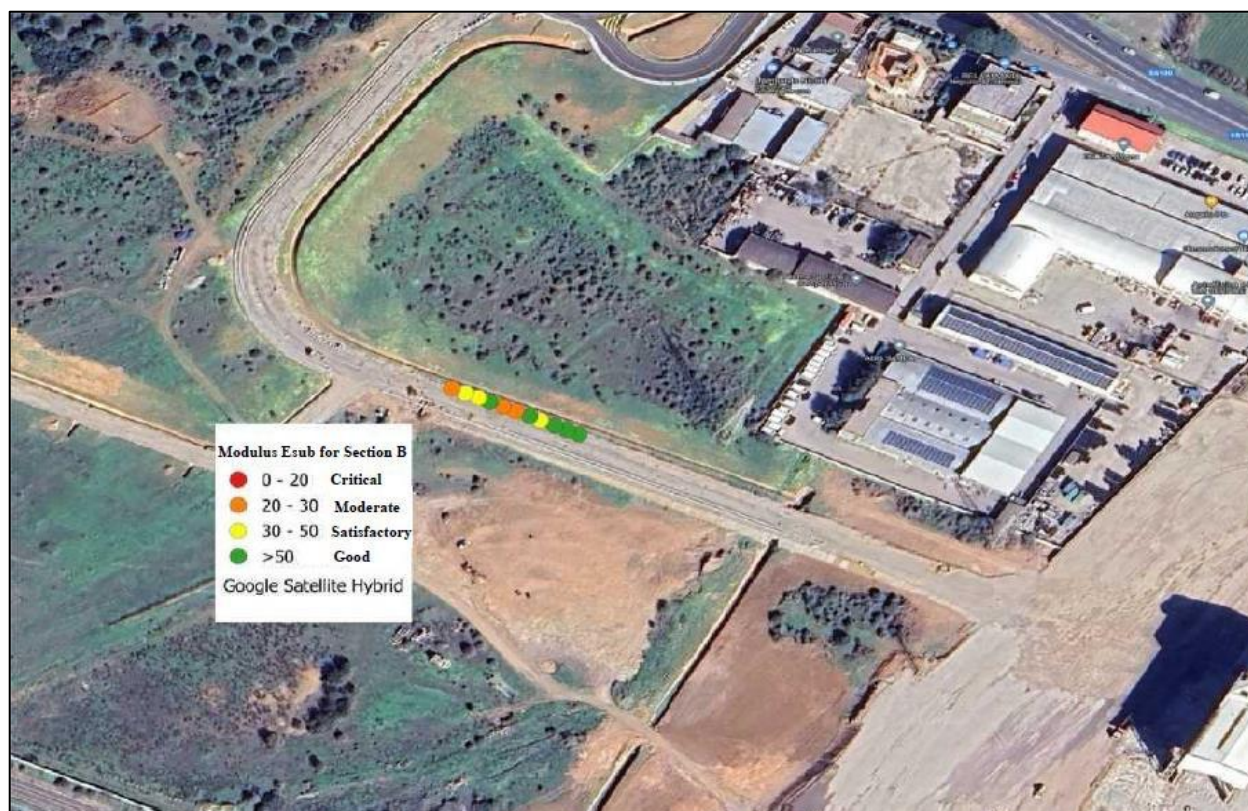
Figur 48. Modul E1 för lagerstrukturen i sektion B.



Figur 49. Modul E2 för lagerstrukturen i sektion B.



Figur 50. Modul E3 för lagerstrukturen i sektion B.



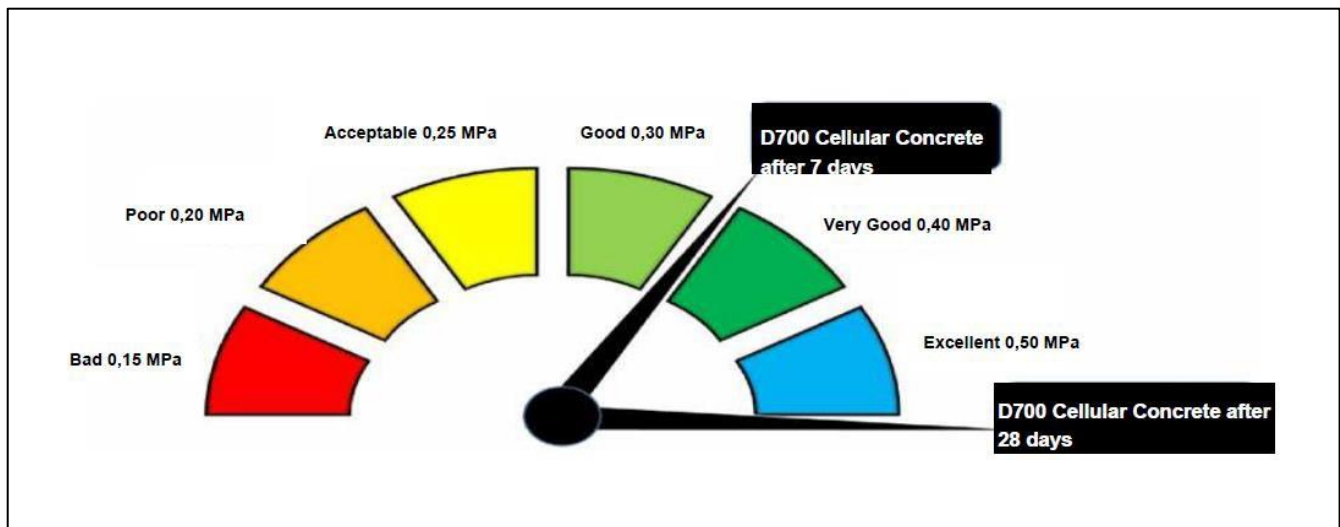
Figur 51. Modul Esub för lagerstrukturen i sektion B.

SLUTSATSER

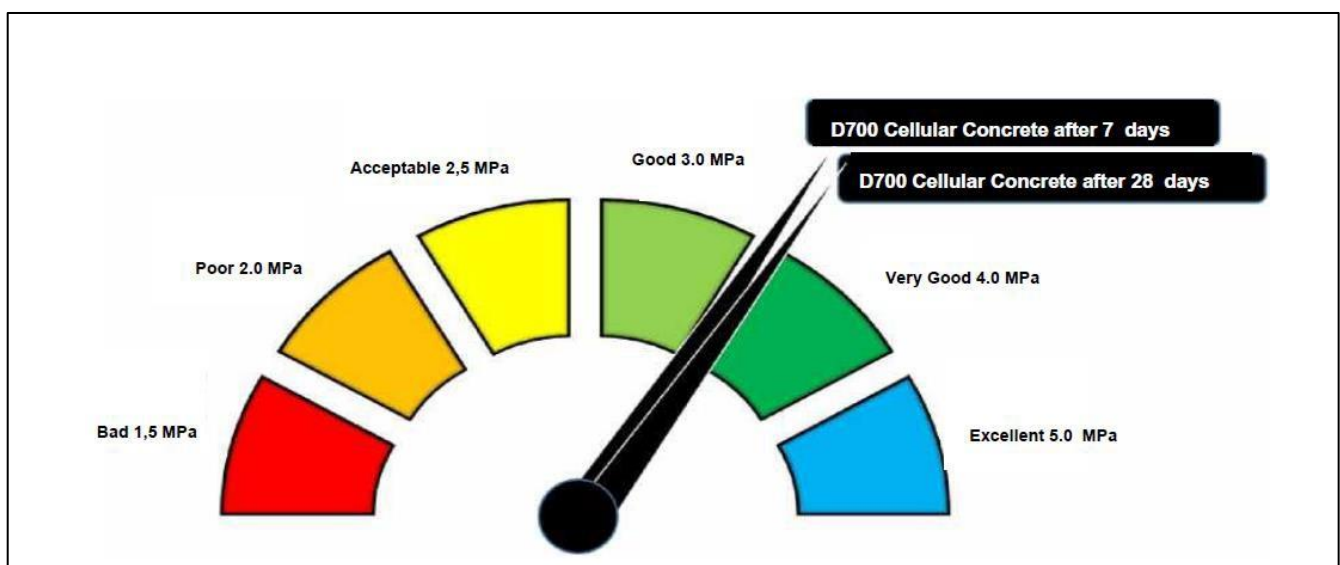
Resultaten av försöket bekräftar helt och hållet att cellbetong kan användas i vägbeläggningar för vanlig trafik.

I synnerhet uppfyller prestandan som erhålls med cellbetong med en densitet på 700 kg/m³ ANAS-kraven för indirekt draghållfasthet (>0,25 MPa) för cementblandningar i basskikt.

Vid mixdesignstadiet gav densiteterna på 600 kg/m³ som analyserades i laboratoriet medelvärden på 0,20 MPa, medan de värden som erhöles i laboratoriet för provinstallationssteget nådde 0,39 MPa efter 7 dagar och 0,53 MPa efter 28 dagar för densiteten 700 kg/m³. Kompressionsvärdena nådde 3,92 MPa efter 7 dagar och 3,99 MPa efter 28 dagar.



Figur 52. Indirekt draghållfasthet hos cementblandningar (MPa)



Figur 53. Tryckhållfasthet hos cementblandningar (MPa)

Tester på plats på trottoarerna gav liknande resultat. Följande tabeller visar medelvärdena för de styvhetsmoduler som erhållits för de enskilda skikten (figur 54 och figur 55)

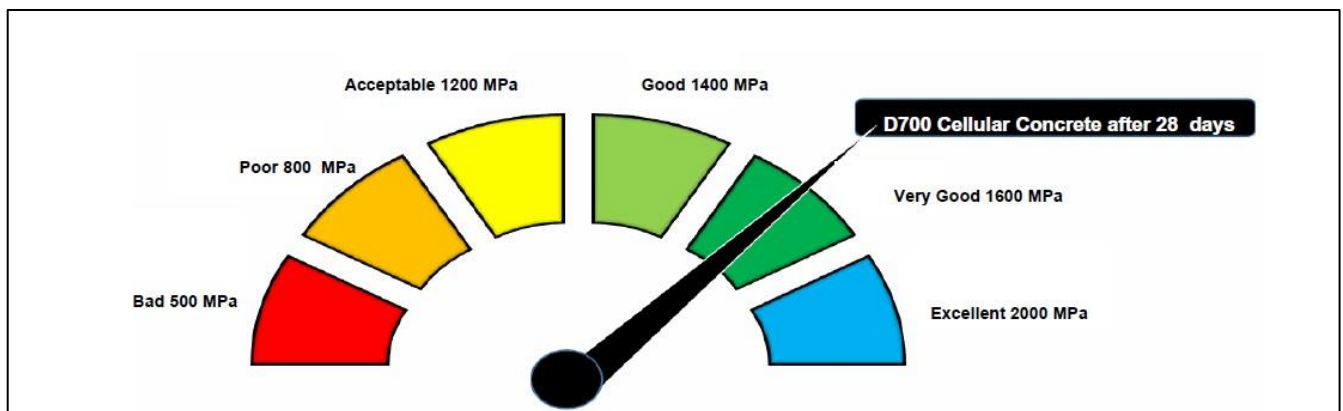
Avsnitt A				
	7 dagar	28 dagar	min	Bra
D700 Cellbetong	1079	1789	700	2000
D400 Cellbetong	469	554	300	500
C&D-stiftelsen	80	110	60	100
Subbbase (på engelska)	111	100	30	80

Figur 54. Medelvärden för styvhetsmodulerna (avsnitt A).

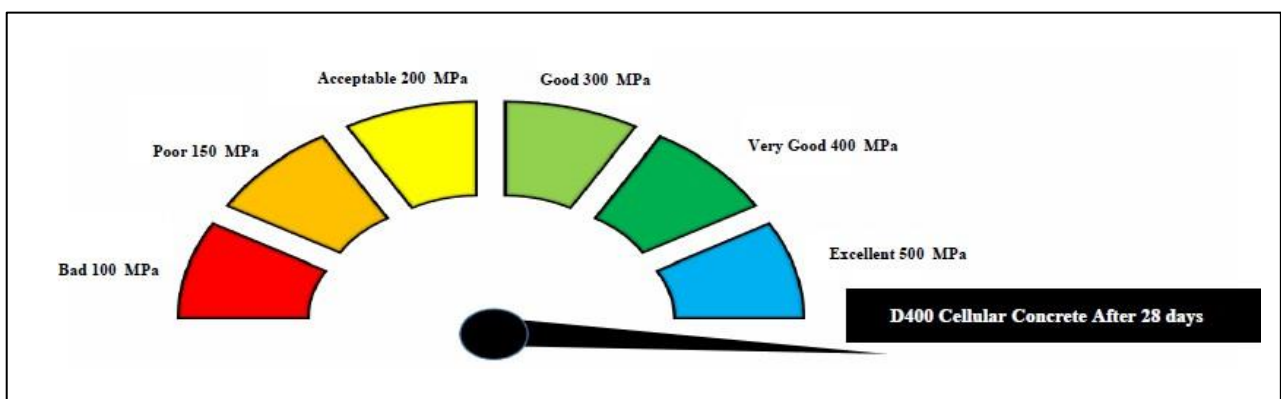
Avsnitt B				
	7 dagar	28 dagar	min	Bra
D700 Cellbetong	1285	1460	700	2000
Blandad granulär foundation	67	60	100	300
C&D-stiftelsen	52	49	60	100
Subbbase (på engelska)	79	55	30	80

Figur 55. Medelvärden för styvhetsmodulerna (avsnitt B).

D700 cellbetong har bekräftats vara ett lönsamt alternativ till cementblandningen när det gäller styvhet, medan D400 erbjuder utmärkt prestanda som ersättning för vägfundament gjorda av stabiliserade granulära blandningar (figur 56 och figur 57).



Figur 56. Styvhetsmodul för cementblandningar i FFWD-tester (MPa).



Figur 57. Styvhetsmodul för granulära blandningar i FFWD-tester (MPa).

När den används som ersättning för cementblandningar och stabiliserade granulära blandningar, uppfyller cellbetong de italienska prestandakraven för vägbeläggningar, med styrka och styvhet över genomsnittet. Utöver de mekaniska fördelarna finns det också fördelar kopplade till materialets lätthet, och förmågan att reglera densiteter och styrkor för att passa specifika sammanhang och spänningskrafter. Förpackningen och installationen erbjuder otvivelaktiga fördelar:

- Det behövs ingen ballast, vilket minskar kostnaderna för stenbrytning, krossning, siktning, torkning, blandning och transport till platsen.
- Det finns inget behov av maskinell hjälp eftersom deras höga flytbarhet gör dem självutjämnande
- det finns inget behov av komprimering
- Cirka 75 % av deras 28-dagarsprestanda uppnås efter 7 dagar. Efterhärdning ökar deras styrka ytterligare;
- Materialet har ljudisolerande och vibrationsavledande egenskaper.

Det föreslås därför att försöket förlängs med det nya tilläggssyftet:

- Genomförande av ytterligare pilotdemonstrationssträckor i samarbete med operatörerna.
- studera livscykeln (LCA) och miljöavtrycket för cellbetong jämfört med traditionella material;
- utarbetande av en särskild handbok;
- Undersökning av den dissipativa prestandan hos cellbetong.