

Projektrapport

Författare:

Roger Nilsson
Skanska Asphalt & Betong-Teknik
VTC-Nord
Box 49
123 21 Farsta
tel: 08-683 43 46
Fax: 08-604 22 80

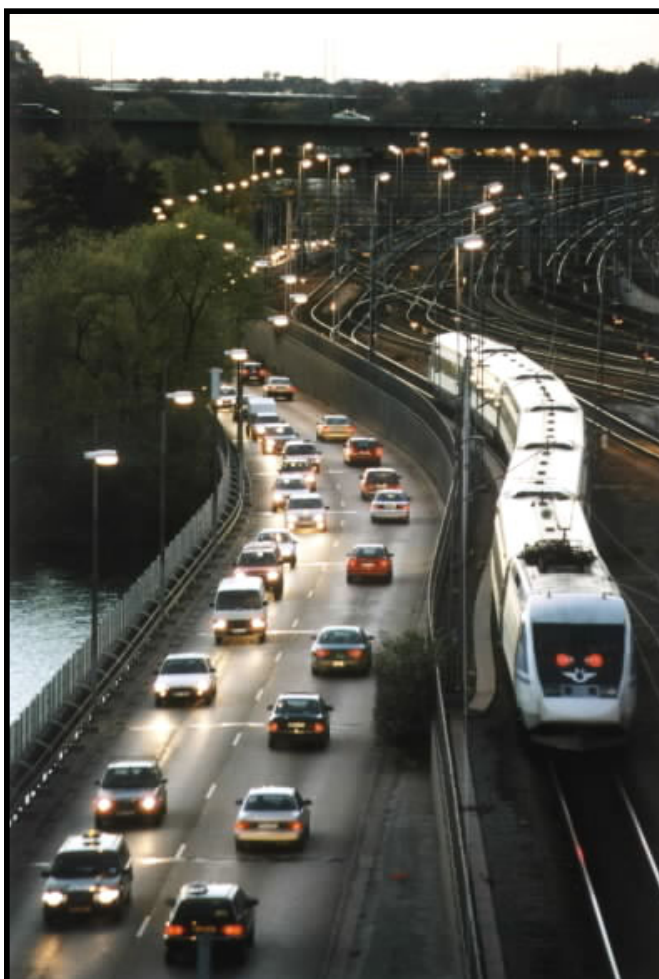
Robert Karlsson
Kungl. Tekniska Högskolan
Avd. Vägteknik
100 44 Stockholm
tel: 08-790 87 02

Datum:

Mars 2004

ASFALT I SPÅRKONSTRUKTIONER

- En förstudie -



1	INTRODUKTION	5
1.1	BAKGRUND	5
1.2	SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR.....	5
1.3	METOD.....	6
1.4	DEFINITIONER.....	6
2	SPÅRKONSTRUKTIONER NU OCH I FRAMTIDEN	7
2.1	BANSYSTEM - NUVARANDE OCH FRAMTIDA BEHOV	7
2.1.1	<i>Systemsynsätt och banunderhåll</i>	8
2.1.2	<i>Ekonomi</i>	11
2.1.3	<i>Miljö</i>	11
2.2	FÖRDELAR OCH NACKDELAR MED BALLASTFRIA SPÅRKONSTRUKTIONER	12
2.3	ASFALT ELLER BETONG I BALLASTFRIA SPÅRKONSTRUKTIONER?	13
2.4	UTFORMNING AV SPÅRKONSTRUKTIONER.....	14
2.4.1	<i>Järnvägar</i>	14
2.4.2	<i>Spårvägar</i>	14
2.4.3	<i>Höghastighetsbanor</i>	15
3	ASFALT SOM KONSTRUKTIONSMATERIAL	15
4	SPÅRKONSTRUKTIONER MED ASFALT	17
4.1	UNDERLAYMENT	17
4.2	OVERLAYMENT.....	18
4.3	SPÅRVÄGAR.....	20
5	ERFARENHETER.....	22
5.1	TYSKLAND.....	22
5.2	ITALIEN.....	23
5.3	JAPAN	24
5.4	USA.....	24
5.5	STORBRIANNIEN	24
5.6	SVERIGE.....	24
6	POTENTIAL OCH FORSKNINGSBEHOV	25
6.1	POTENTIAL FÖR ASFALT I SPÅRKONSTRUKTIONER	25
6.2	UNDERLAG FÖR DOKTORANDPROJEKT	26
7	SLUTSATSER	28
8	REFERENSER.....	29
	BILAGOR.....	31

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Under senare år har en intensiv strukturförändring av järnvägen påbörjats. Ökad kundanpassning och avregleringar samt satsningar på nyinvesteringar har skapat ett transportsystem som blivit ett betydligt attraktivare och konkurrenskraftigare alternativ för resande och godstransporter. Idag reser fler människor än någonsin med tåg och godstransporterna ökar. För att vidare utveckla järnvägen måste bland annat krav på kortare restider, bättre punktlighet samt ökad kapacitet med tyngre och längre tåg uppfyllas. För att kunna möta efterfrågan på högre hastigheter och ökad bärighet kommer allt högre krav på järnvägsinfrastrukturen att ställas. Genom tidigare eftersatta investeringar finns dessutom ett stort uppdämt behov av att bygga ut och effektivisera befintligt järnvägsnät. Även om betydande satsningar på järnvägen kommer att genomföras fram till 2015 är anslagen för angelägna nyinvesteringar och drift- och underhållsåtgärder för låga [1]. Det finns därför ett stort intresse och behov hos Banverket att använda kostnadseffektiva lösningar som ger lägre livscykelkostnad och större samhällsnytta.

Utvecklingen mot snabbare tåg och tyngre laster ställer högre krav på framtidens spårkonstruktioner. Ökad hastighet innebär att geometriska avvikelser hos rälsen leder till större dynamiska laster i både horisontal- och vertikalled. Detta bidrar naturligtvis till minskad komfort för tågresenärerna samt reducerad framkomlighet, men påskyndar även nedbrytningen av spårkonstruktionen varvid behovet av underhåll ökar. De dynamiska lasterna kan också leda till sättningar i grunden både under järnvägen och intilliggande konstruktioner. I till exempel Tyskland, Frankrike och Italien har höghastighetståg funnits länge och behovet av att utveckla nya spårkonstruktioner med bättre prestanda och längre underhållsintervall har lett till satsningar på så kallade ballastfria spårkonstruktioner. Anläggningskostnaden för dessa är normalt högre, vilket ska uppvägas av högre prestanda och lägre underhållskostnader. För att öka banöverbyggnadens stabilitet och bärighet har främst betong och asfalt använts. Asfalt och betong tar i dessa konstruktioner helt eller delvis över makadamens traditionella funktion som lastfördelare mellan slipers och underliggande överbyggnadslager.

Bidragande orsaker till det nuvarande intresset för asfalt som konstruktionsmaterial i spårkonstruktioner är bl.a. ökade kunskaper om asfalt, samt tillgången på lämplig utrustning och kompetens för läggning av asfalt. Spårkonstruktion med asfalt har också visat sig vara ett kostnadseffektivt alternativ till betongkonstruktioner. Frågan har därför väckts om genomförande av ett doktorandprojekt vars syfte skulle vara att lyfta kunskapsnivån inom rubricerat område. Medel har skjutits till av SBUF (Sveriges Byggtreprenörers Utvecklingsfond) och CDU (Centrum för forskning och utbildning i drift och underhåll av infrastruktur) för genomförandet av en förstudie.

1.2 Syfte och avgränsningar

Syftet med föreliggande rapport är att utgöra underlag för värdering av berättigandet i ett doktorandprojekt på området, och hur det i så fall bör utformas. Målet är därför att beskriva nuvarande kunskapsläge om asfalt i spårkonstruktioner, att fastställa behovet av forskning, samt att undersöka den potentiella nyttan med asfalt i spårkonstruktioner. Rapporten är avgränsad till studier av spårkonstruktioner där asfalt ingår med funktion att framför allt förbättra spårstabiliteten och lastspridningen.

1.3 Metod

Rapporten baseras på litteraturstudier, studieresa, kontakter med specialister, samt en workshop arrangerad den 25 februari 2003. Tidigare har litteraturstudier i ämnet genomförts av Ragnar Hedström 1996 [2] och Henrik Sjöholm 1998 [3]. För att finna relevant litteratur av senare datum har en litteratursökning genomförts av VTI från 1996 och framåt. Kompletterande information om nyutkommen litteratur har även erhållits via kontakter med specialister.

Av särskilt värde har kontakterna varit med Tekniska Universitetet i München, som besöktes den 13 februari 2003, samt kontakterna med SITEB (Italian Asphalt and Road Association), Delft RRRL (Road & Railway Research Laboratory, Holland), FIAT ENGINEERING (Italien), EAPA (European Asphalt Pavement Association, Shell, Nynäs och VTT (Finland). Även kontakter med specialister från Banverket, VTI, Skanska, SL och KTH har givit värdefull information

1.4 Definitioner

Asfalt

Blandning av bitumen och stenmaterial, utlagd och packad.

Asfaltspår (Full-depth)

Asfaltspår är ett ballastfritt spår med en uppbyggnad av asfalt från terrass till sliper.

Bankropp

Med bankropp avses en traditionell konstruktion bestående av tjälskyddsmaterial, underballast, överballast med nedbäddade sliprar, infästningsanordningar, samt spårväxlar.

Ballastfria spår

Ballastfria spår är i princip stabila konstruktioner där man framförallt utnyttjar asfalt eller betong för att låsa slipern och fördela laster ned i konstruktionen.

OL-spår (Overlayment)

I OL-spår vilar slipers på bärande lager av asfalt.

Höghastighetsspår

Höghastighetsspår är en konstruktion som klarar påfrestningarna från de riktigt snabba tågen med en hastighet större än 250 km/h.

Slabtrack

Slabtrack består av prefabricerade betongelement med rälfästen som placeras på en betongplatta och sedan sammanfogas till ett spår.

Stabila spår

Stabila spår är en annan term för de ballastfria spåren. Här syftar man direkt på egenskaperna hos de spår som har den ballastfria uppbyggnaden med en ökad stabilitet som följd.

STH

STH är en förkortning för största tillåtna hastighet.

STAX

STAX är en förkortning för största tillåtna axellast.

Spårläge

Spårläget avser skillnaden eller avvikelserna från det spårgeometriska börvärdet.

STVM

STVM är en förkortning för största tillåtna vikt per vagnmeter.

Trafikbelastning

Trafikbelastning avser intensiteten av det gods och eller persontrafik som förekommer på sträckan.

UL-spår (Underlayment)

UL-spår är i princip ett ballastspår där underballasten helt eller delvis är ersatt av asfalt. Överballasten låser slipern och fördelar laster ner på asfalten.

2 Spårkonstruktioner nu och i framtiden

2.1 Bansystem - Nuvarande och framtida behov

All professionell aktivitet bör karakteriseras av kontinuerlig, långsiktig utveckling och insikt om nutida kunskapsnivå och framtida behov. Något som paradoxalt nog ofta kommer i konflikt med verklighetens mer kortsiktiga budgetrestriktioner, bristande personella resurser och ökande krav på prestationer. Banverket har i sin strävan att utveckla verksamheten satt upp som mål att fram till år 2015 minska underhållskostnaderna, förlänga underhållsintervallen, höja medelhastigheterna, tillåta ökade axellaster (STAX) och samtidigt öka komforten och punktligheten [1]. Målen ska uppnås genom byggande av nya banor, samt uppgraderingar av befintliga banor. Trots betydande satsningar i järnvägsnätet kommer anslagen inte att räcka till att genomföra angelägna utbyggnader och vidmakthållande av en hög banstandard på hela järnvägsnätet. En prioritering av de mest angelägna åtgärderna har därför formulerats där bland annat satsningar på höghastighetståg har skjutits på framtiden. Även drift- och underhållsåtgärder för mindre trafikerade banavsnitt har nedprioriterats. Med tanke på att Sverige är ett glesbefolkat land med begränsat reseunderlag och begränsade anslag förefaller denna prioritering rimlig. På sikt bör betydande satsningar på järnvägsinfrastruktur genomföras för att inte urholka en fortsatt positiv utveckling av järnvägen och Sverige. Sådana satsningar och investeringar i infrastrukturen måste göras för framtida behov och möjliggöra järnvägens utveckling. För att skapa förutsättningar för samhällsekonomiskt försvarbara investeringar är det viktigt att man kan nyttja de mest kostnadseffektiva lösningarna anpassade för svenska förhållanden.

Ökad efterfrågan och ökat behov av resor och transporter har lett till en överbelastning på vägnätet på ett antal vägsträckor framförallt i närheten av och i storstadsregionerna. Detta har medfört begränsade utvecklingsmöjligheter för vägtrafiken på grund av ökad trängsel, lägre medelhastigheter, längre transporttider, samt ökad miljöbelastning. Genom utbyggnad av järnvägen har denna utveckling delvis kunnat reduceras. Det finns dock en stor potential att ytterligare flytta över trafik från de överbelastade vägarna till den säkrare och miljömässigt bättre järnvägen. En utbyggnad av järnvägen skulle bidra till stora miljövinster genom minskad flyg- och biltrafik. Vidare skulle större sammanhängande regioner och marknader inom Sverige och i Europa skapas. Genom utbyggnad och ökad separation av person- och godstrafiken kan högre kapacitet och lönsamhet för godstrafiken skapas. Infrastrukturens omfattning och standard har då att möta de behov och krav som användarna kan ställa såsom kortare restider, förbättrad punktlighet, fler tåg på spåren, samt större kapacitet för godstrafik. Snabbare tåg med största tillåtna hastighet (STH) 250 km/h bidrar till regionsförstoring med dagspendling över avstånd om ca 200 km. Vidare har basnäringarna skog, gruva och stål länge velat köra både tyngre och längre tåg. En ökning av största tillåtna axellast (STAX) från 22.5 ton till 25 ton eller 30 ton är

efterfrågad. Vidare ställs krav på ökning av största vikt per vagnmeter (STVM) från 6.4 ton till 8-10 ton.

Snabbare tåg och större tillåtna axellaster kommer dock att ställa allt högre krav på banöverbyggnaden och dess ingående komponenter. Ökade hastigheter och ökande axellaster har visat sig ha en stor inverkan på spårets nedbrytningsprocess, även om alla faktorer inte är kända [4]. Främst är banöverbyggnadens konstruktion och uppbyggnad av betydelse för att ta hand om de spårkrafter som tågen alstrar. De olika kraftkomponenterna orsakar och påverkar olika tillståndförändringar som t.ex. spårlägesförskjutningar, slitage på räl, sättningar, skador på slipers och ballast [4, 5]. För ballast kan tillståndsförändringar hänföras till fem huvudsakliga orsaker enligt [6]:

Nedbrytning av ballast	(76%)
Infiltration från underliggande kornlager	(13%)
Infiltration av föroreningar från överytan	(7%)
Infiltration från undergrunden	(3%)
Materialnötning orsakad av sliprarna	(1%)

Det är påtagligt att nedbrytning av ballast i form av nedkrossning svarar för nästan 4/5 av den tillståndförändring som inträffar i ballasten. Med ökade hastigheter och laster kommer påkänningen och nedbrytningen av ballasten att öka ytterligare. Vid hastigheter över 300 km/h rapporteras en snabb ökning av finpartiklar (nedkrossning), vibrationskänslighet, samt skador på räl och fordon av kringflygande ballastmaterial [16]. Även vid användandet av högkvalitativt ballastmaterial finns det en påtaglig risk att underhållskostnaderna kommer att öka vid ökande hastigheter.

För att järnvägen skall utvecklas kommer betydande satsningar på ny- och ombyggnationer att krävas. För att använda tilldelade anslag på bästa sätt behövs ny och mer kostnadseffektiv banöverbyggnad som motsvarar framtida krav på lägre underhållskostnader och längre underhållsintervall. Nya och ändamålsenliga banöverbyggnader behöver således utvecklas för att en snabb och rationell utbyggnad av järnvägen skall åstadkommas.

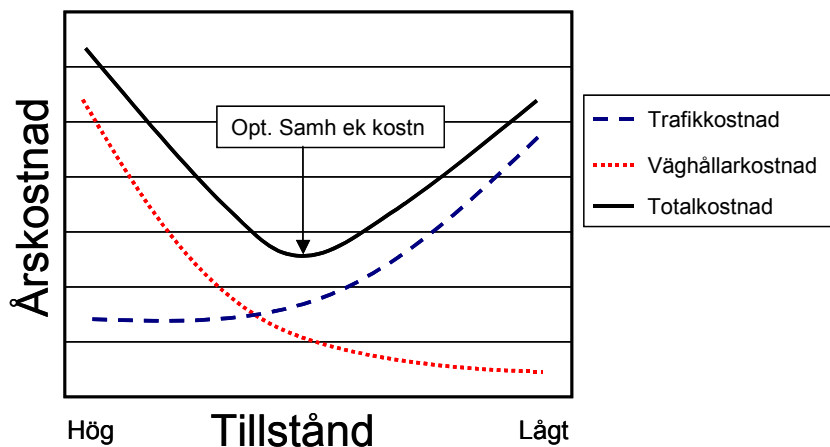
2.1.1 Systemsynsätt och banunderhåll

För att kunna förbättra och optimera banstandarden vid underhåll, re- eller nyinvesteringar är det nödvändigt att betrakta bankroppen som ett system och ha förståelse för samspelet mellan de komponenter som ingår i bankroppen. I bankroppen ingår bland annat ballast, sliprar, räler, infästningsanordningar, underbyggnad, spårväxlar etc. vilka har olika egenskaper och funktioner i överbyggnaden. Huvuduppgiften för dessa komponenter är att säkerställa en adekvat funktion, dvs. gångtid, komfort och säkerhet, genom att överföra krafter från framförallt tågtrafiken så att inte påkänningar i undergrunden eller i någon komponent överskrids. Vidare skall bankroppen säkerställa att inga oacceptabla tjuäldeformationer uppkommer. De ingående komponenterna skall dessutom vara tillräckligt beständiga och anpassade för lokala trafik- och klimatförhållanden. Förhållandet mellan kostnad, produkt (banöverbyggnad) och funktion illustreras schematiskt i figur 2.1.



Figur 2.1 Förhållandet mellan kostnad, produkt (banöverbyggnad) och funktion [7]

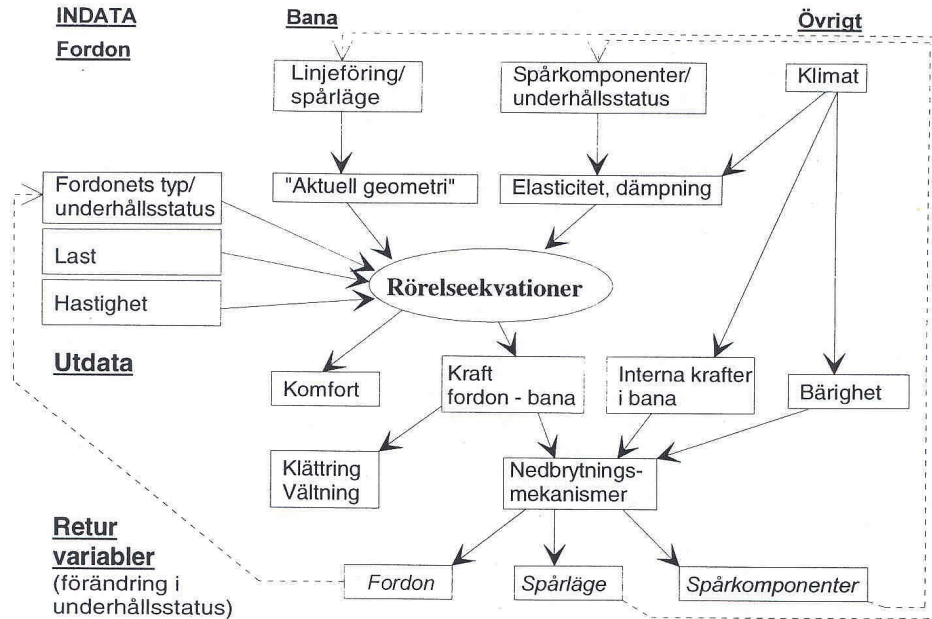
Enligt denna figur ges förenklat att banstandarderna är en konsekvens av tillgängliga anslag och ställda funktionskrav. En hög kostnad medför generellt sett en högre banstandard som uppfyller högt ställda funktionella krav. En låg kostnad kan däremot medföra en låg banstandard vilken svarar mot lågt ställda krav. För att uppnå en optimal banstandard ur ett samhällsekonomiskt perspektiv är det väsentligt att även ta hänsyn till den totala kostnaden för banöverbyggnaden och järnvägstrafiken, som till exempel trafikantkostnader och erforderliga underhållsåtgärder under anläggningens tekniska livslängd. Inom det vägtekniska området brukar förhållandet mellan kostnad och tillstånd för en vägöverbyggnad schematiskt illustreras enligt figur 2.2.



Figur 2.2 Samhällsekonomisk kostnad som funktion av tillståndet hos vägar.

I figur 2.2 illustreras ursprunget till en optimal samhällsekonomisk årskostnad för givna väghållar- och trafikantkostnader. Detta optimum svarar mot ett specifikt tillstånd vilket uppfyller ställda krav. Väghållarkostnaden är en funktion av investeringskostnad och vald underhållsstrategi. En hög investeringskostnad ger normalt sett lägre underhållskostnader medan en låg investeringskostnad ofta resulterar i höga underhållskostnader. En låg nivå på vägens tillstånd bidrar till att trafikantkostnaderna ökar. För vägtrafikanter innebär detta ökade kostnader i form av ökat fordonsunderhåll och reparationer samt sänkta medelhastigheter. Om hänsyn tas till både väghållar- och trafikantkostnader ges en optimal samhällsekonomisk årskostnad enligt figur 2.2. Om bara väghållarens kostnader beaktas erhålls således ingen optimal årskostnad utan lägsta kostnad ges utifrån den lägsta "skamgränsen" för acceptabelt tillstånd. Det bör dock påpekas att denna "underhållsstrategi" på sikt leder till kapitalförstöring. Genom att analysera olika väghållarkostnader (konstruktionstyper/underhållsstrategier) och trafikantkostnader kan den mest optimala samhällsekonomiska konstruktionen väljas.

Detta synsätt kan även praktiseras på järnvägsöverbyggnader för att utvärdera olika produkter (dvs. banstandard). För att kunna utforma en banöverbyggnad på ett optimalt sätt krävs att samband mellan kostnad, produkt och funktion kan formuleras. Dessa samband är dock mycket mer komplexa än vad figur 2.1 ger sken av. En bidragande orsak till detta går att finna i den stora mängd komponenter som ingår i en banöverbyggnad, samt de yttre faktorer som på ett eller annat sätt inverkar på komponenterna. Vidare påverkar de olika komponenterna varandra inbördes. Ytterligare osäkerhetsfaktorer berör framtida klimat, axellaster och hastigheter, eftersom komponenterna byggs in i ett järnvägssystem som skall uppfylla vissa funktioner under hela den tekniska livslängden. En schematisk bild av olika variabler och samband mellan olika komponenter i banöverbyggnaden illustreras av figur 2.3.



Figur 2.3 Samband mellan fordon och bana med avseende på tillståndsförändringar. [4]

Ur figuren framgår att banöverbyggnadens tillståndsförändring i princip påverkas av tre huvudfaktorer, trafikbelastning (ex. last och hastighet), klimat samt spårets egenskaper (ex. geometri och dämpning). Genom kännedom om dessa faktorer kan de dynamiska krafterna mellan fordon och spår beräknas med hjälp av rörelseekvationer. De beräknade krafterna och överbyggnadens egenskaper kan sedan användas för att uppskatta överbyggnadens nedbrytning och tillståndsförändringar. Dessa leder i sin tur till nya förutsättningar och antaganden till kraftberäkningarna. Detta förfaringssätt med successiva iterationer medför att en banöverbyggnad kan analyseras utifrån olika trafikpåkänningar och ingående överbyggnadskomponenter med avseende på tekniska och ekonomiska aspekter. Även om ovanstående beskrivna systemsynsätt inte är fullständigt och att flertalet av sambanden mellan de ingående komponenterna för närvarande inte kan kvantifieras så ger modellen en fingervisning om hur olika banöverbyggnader kan utvärderas.

En annan viktig aspekt vid val av överbyggnad och dess komponenter är kopplad till produktionstekniska förutsättningar. Vid sidan av rent tekniska och ekonomiska aspekter för varje komponent måste följande produktionssystemaspekter beaktas [4, 7]:

- Hur rationellt en komponent kan byggas in i banöverbyggnaden,
- Hur svårt eller enkelt det är att byta ut en komponent,
- Tillgänglighet hos underhållsresurser och komponenter,
- Begränsning av tillgänglig arbetstid på spåret,
- Möjligheten att återanvända begagnade komponenter.

Vid optimering av banstandard är det således väsentligt att betrakta banöverbyggnaden som ett system med ingående komponenter där varje del bidrar till att uppfylla ställda funktionskrav. För att byta ut eller ersätta enskilda eller kombinerade komponenter är det viktigt att inte utvärderingen sker på komponentnivå utan på systemnivå. Vad som är optimalt för de enskilda komponenterna är inte nödvändigtvis optimalt när man betraktar banöverbyggnaden som en helhet. I detta sammanhang innebär systemtänkande att man studerar hur vissa förändringar påverkar funktionen på hela systemet. Exempel på förändringar kan vara byte av rälsinfästningsanordningar, införande av nya material eller nya konstruktionstyper. Genom detta systemsynsätt kan nya och innovativa material, tekniker och produktionsmetoder utvärderas tekniskt och ekonomiskt.

2.1.2 Ekonomi

Ekonomi är den drivande kraften framför andra när det gäller utveckling av nya material och tekniska lösningar som t.ex. ballastfria konstruktioner. Kostnaden för banöverbyggnader beror av ett flertal parametrar som t.ex. cement-, bitumen- och ballastpris, transportkostnader, undergrundsmaterial, typ, storlek och svårighetsgrad på projektet osv. Ballastfria konstruktioner är ofta dyrare att bygga, men exakt hur mycket är svårt att säga eftersom kostnaderna varierar mellan de redovisande objekten. Erfarenheterna hittills pekar på att det är ungefär 20% dyrare att bygga ett ballastfritt spår på en vanlig jordterrass [8]. För tunnelsektioner är det i vissa fall ingen skillnad. Generellt har man indikerat att ett ballastfritt spår är ekonomiskt om investeringskostnaden inte överstiger kostnaden för ett traditionellt ballastspår med mer än 30 % [9]. För Nordiska förhållanden finns för närvarande inte någon aktuell prisbild, förutom för spårvägskonstruktioner. Internationella erfarenheter visar att asfaltkonstruktioner är billigare än motsvarande av betong. Exakt hur mycket är även här svårt att säga. För att kunna värdera olika konstruktionstyper räcker det inte med att jämföra investeringskostnaderna utan man bör jämföra livcykelkostnaderna där underhållskostnader under livslängden inkluderas. Därigenom kan den ur samhällsekonomiskt perspektiv mest lönsamma konstruktionstypen väljas. För verksamheter som är starkt styrda av budgetrestriktioner kan det vara svårt att fullt ut agera ur ett samhällsekonomiskt perspektiv. Tillgängliga medel räcker inte till alla behov och de som finns måste fördelas enligt olika prioriteringar. Strävan att kostnadseffektivisera järnvägen leder dock till utnyttjande av tillgängliga resurser i form av material, tekniker och kunskap på bästa sätt.

2.1.3 Miljö

Vid införande av nya ämnen och material är det viktigt att undersöka hur dessa kommer att påverka arbets- och närmiljön. Vidare är det angeläget att studera dess påverkan på naturmiljön och möjligheterna till kretsloppsanpassning. För asfalt tas naturresurser i anspråk i form av ballastmaterial, bitumen och energi för transporter och uppvärmning. Därtill kommer miljöpåverkan i form av buller och emissioner under produktions- och driftstadiet, samt slutligen vid återvinning. Då både ballast och bitumen är ändliga naturresurser är det angeläget att inte slösa med dem i onödan utan endast använda dem där de ger störst nytta. En minskad användning av ballast och bitumen är därför önskvärd. När det gäller miljöpåverkan under tillverknings- och produktionsprocessen har moderna asfaltverk och utläggningsutrustningar idag effektiva system

för att minska spridningen av damm- och stoftpartiklar, och för reducering av buller. Vidare finns även en bra dokumentation över inköp, användning och avfallshantering av kemikalier. Därtill arbetar de flesta entreprenörer med att miljöklassificera olika kemikalier och tillsatser för att säkerställa att inga farliga och giftiga material används i asfaltbeläggningar, eller under tillverkning, utläggning, drift, underhåll och återvinning. Vid återvinning bör man beakta asfaltens föroreningshalt vilken kan komma från trafik och driftsrelaterade åtgärder. En stor undersökning av asfaltarbetare har visat att det inte kan påvisas någon ökad cancerrisk för denna yrkesgrupp [10]. När det gäller gamla asfaltbeläggningar kan de i regel återvinnas till 100 % i samma funktion som tidigare. Med den teknik som finns idag är det mycket lätt att ta vara på gammal asfalt. De utrustningar som används har stor kapacitet och den gamla beläggningen kan fräsas, krossas och siktas i relativt enkla anläggningar för att sedan komma till användning. Återvinning av asfalt är positivt både från miljömässiga och ekonomiska aspekter genom att resurser sparas, samt att behovet av att köra gammal asfalt till soptippen eller deponi försvinner.

2.2 Fördelar och nackdelar med ballastfria spårkonstruktioner

I litteraturen förekommer ett flertal argument för ballastfria spår. Valet mellan ballast eller ballastfria spår är en komplex fråga med många parametrar att ta hänsyn till. Fördelarna med ballast är i stor utsträckning knutna till lägre produktionskostnad och nuvarande mångåriga erfarenhet av underhåll. Vinsterna med ballastfria spår ökar med ökad livslängd [2, 3, 11, 12, 13]. Förenklat kan man lista de positiva och negativa ekonomiska faktorerna som spelar in i valet mellan ballast- och ballastfritt spår på följande sätt.

Nackdelar

- Investeringskostnader.

Investeringskostnaden är högre, frågan är i dagsläget bara hur mycket. En vanlig kommentar är att kostnaden är nära det dubbla när man jämför med ett vanligt spår på en jordterrass, men både högre och framför allt lägre siffror nämns i litteraturen. Om man tittar på en höghastighetskonstruktion är skillnaderna mellan ballastfritt- och traditionellt spår mycket liten. Troligen är den försumbar, vilket har givit DB tillräckligt med skäl för att bygga alla nya konstruktioner i ballastfritt. I framtiden kommer man att optimera konstruktionerna i en form av kontinuerlig design på standardbanor vilket kommer att minska kostnaderna.

- Bullerstörningar.

Erfarenheterna visar att bullernivåerna stiger med upp till 5dB vilket kräver buller- reducerande åtgärder (gäller förmodligen i första hand betongöverbyggnader). Olika material har placerats mellan och vid sidan av rälen i buller- och responsreglerande syfte. Livslängden för åtgärderna är okänd men i sammanhanget torde kostnaderna vara små.

Fördelar

+ Underhållskostnader

Det minskade underhållsbehovet driver utvecklingen och införandet av ballastfria spår. Minskat underhåll ger bl.a:

- Kortare tider för stängning av spår
- Minskade omledningskostnader
- Högre medelhastigheter på spåren
- Bättre utnyttjande av tåg
- Lägre personalkostnader

Uppgifterna om minskningen i underhållskostnader varierar mellan olika järnvägsförvaltningar. Italienarna räknar med besparingar på 85-95% och japanerna med ca 75%. Generellt sett är det fortfarande svårt att uppskatta vad den slutliga underhållskostnaden blir då konstruktionerna är dimensionerade för en livslängd på 60 år. De allra flesta konstruktionerna har inte varit i behov av underhåll efter ca 10 års drift.

+ Minskade stationära laster på konstbyggnader.

På broar kan man tillgodoräkna sig besparingar i dimensioneringen av själva bron. Spårets vikt minskas med 2/3 vilket leder till en besparing på ca 3,5 ton/m. Om denna besparing slår igenom på kostnaden för brokonstruktionen är oklart men det är en positiv faktor att räkna med.

+ Minskad användning av bekämpningsmedel.

Att inte behöva bespruta ogräs på banvallarna ses som en positiv effekt

+ Minskat slitage på vagnparken.

Denna parameter är svår att kvantifiera.

+ Investeringskostnader i tunnlar.

I tunnlar kan banans höjd reduceras med 2/3 vilket leder till stora besparingar vid tunnelbyggande. Besparingarna i tunnelkonstruktionen betalar i princip överbyggnaden. Här kan man alltså få ett stabilt, nästan underhållsfritt spår på köpet enligt vissa rapporter. Det visar sig också att många provsträckor ligger i tunnlar.

+ Komfort

Hur värderas vinster i ökad komfort tack vare minskat buller och minskade vibrationer i vagnarna? Skillnaderna inne i moderna tåg är relativt små och är svåra att värdera.

+ Stabilare spårläge.

Stabilare spår ger konstruktörerna möjlighet att minska kurvradierna hos banan. Vinsten med detta är t.ex. att järnvägar kan byggas utmed motorvägar och inte behöver två skilda utrymmen.

2.3 Asfalt eller betong i ballastfria spårkonstruktioner?

I nuläget är det svårt att värdera för- och nackdelar vid jämförelser mellan asfalt och betong. Varje material har sina specifika för- och nackdelar. Till sist måste värderingen bygga på en analys av ekonomi och nytta. När det gäller asfalt finns utrustning och kompetens tillgänglig eftersom traditionella metoder används och materialkostnaderna är lägre [14]. Betong har å andra sidan valts i både Japan och Tyskland i sammanhang där mycket hög kapacitet och pålitlighet krävs. Valet mellan betong och asfalt är dock mer komplicerat än så. Betong och asfalt, i likhet med konventionella ballastspår, är lämpliga i olika sammanhang.

Ur materialsynpunkt är betong ett styvt material och asfalt ett mer eftergivligt material (se mer om viskoelasticitet i bilaga 4). Strikt ur denna synvinkel borde betong bidra till att bibehålla spårstabiliteten under längre tid. Även lastspredningen hos betong borde vara effektivare, men samtidigt mer riskfylld eftersom sättningar på grund av t.ex. tjäle kan leda till uppsprickning av spårkonstruktionen med stora negativa konsekvenser som följd. Detta är mekanismer som är väl kända inom vägbyggnad. En stor nackdel med styv betong är att responsen hos spårkonstruktionen måste kompenseras med mjuka mellanlägg av t.ex. gummi mellan räls och slippers, vilket är mindre angeläget för asfalt. Betong åldras dock inte på samma sätt som asfalt men livslängden är inte obegränsad. En lång livslängd kan erhållas också hos asfalt om den proportioneras med låg hålrums halt och bra bitumen. Underhåll och eventuella reparationer är betydligt enklare och snabbare att utföra på konstruktioner av asfalt jämfört med av betong.

2.4 Utformning av spårkonstruktioner

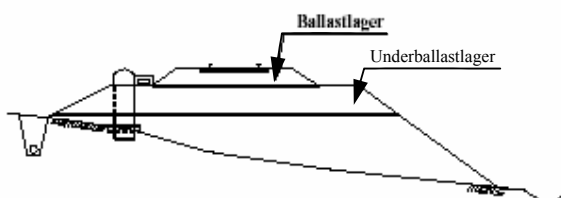
I syfte att ge en kort bakgrund till hur bärande lager i spårkonstruktioner normalt utformas ges en sammanfattning av grundläggande principer, följt av gängse utformningar.

En spårkonstruktion består vanligen av räl, infästning, slipers, ballast och underbyggnad. Rälens uppgift är att utgöra farbana för tåg och fördela laster vidare ned i konstruktionen. Ur komfort- och säkerhetssynpunkt är det viktigt att rälen är rak och har goda mekaniska och hållfasthetsegenskaper. Rälen för lasten vidare ned till slipers via infästningspunkter. Infästningspunkternas utformning och avstånd mellan slipers (i de vanligare tvärsliperssystemen) påverkar både respons och de laster som sprids nedåt i konstruktionen. I spårvägskonstruktioner är det vanligt att slipers utelämnas (se exempel i avsnitt 4.3). Slipers och alternativa lösningar har bl.a. till uppgift att upprätthålla spårläge och föra ned laster i både vertikal- och horisontalplanet till ballastlagren. Som framgår av bilaga 1 (Utdrag ur Banverkets föreskrifter Typsektioner för banan. BVH 585.31) är ballastlagrets funktion primärt kopplad till hållfasthet och mekaniska egenskaper. Även förmågan att fixera slipers och därmed ge stabilt spårläge är av stor vikt.

I ett europeiskt projekt, EUROBAL, European Research projekt for Optimised BALLasted Tracks, framgår att några av de viktigaste faktorerna med avseende på försämring av spårgeometri kan hänföras till spårelasticitet, samt variation i elasticiteten [15]. Vid betraktande av spårkonstruktionens funktion är det således viktigt att ta hänsyn till hela systemets respons under last. Förändras en del i spårkonstruktionen, till exempel vid införandet av ett asfaltbundet lager, kan detta medföra behov av ytterligare modifieringar för att bibehålla en önskad respons. Responsen påverkar i sin tur t.ex. slitage, lastfördelning och buller.

2.4.1 Järnvägar

I figur 2.4 visas en typisk utformning av en järnväg. Normalt är ballastlagrets tjocklek 0.3 m, utom på broar med genomgående ballastlager där 0.4 m istället föreskrivs. Ballastskuldrans bredd (Måttet mellan ytterkant ballastlager och ytterkant slipers) skall vara minst 0.4 m men ökas i skarpa kurvor till 0.55 m. Krav som ställs på makadamballast avser bl.a. petrografi, glimmerhalt, sprödhetstal och kornstorleksfördelning. Underballastlagrets tjocklek varierar med klimatzon enligt tabell i BVH 581.16, dock minst 0.8 m utom på bergbank då 0.5 m tillåts.



Figur 2.4 Bankropp enligt Banverkets normer.

2.4.2 Spårvägar

De svenska kommunerna bär själva ansvaret för utformning av sina respektive spårkonstruktioner. Krav och förväntningar på spårvägskonstruktioner skiljer sig delvis från de statliga järnvägarna. Spårvägarna ska till exempel även fungera i stadstrafik och ha goda bulleregenskaper men behöver i gengäld inte bära särskilt höga laster. Kommunernas ansvar och de varierande kraven på spårvägarna kan vara orsaker till att utformningen av spårkonstruktioner i Stockholm, Göteborg och Norrköping visar en större variationsrikedom i jämförelse med järnvägsnätet.

2.4.3 Höghastighetsbanor

Utformning av spårkonstruktioner för hastigheter över 300 km/h behandlas i en state-of-the-art rapport från UIC (International Union of Railways) [16]. I rapporten betonas bl.a. vikten av stabila spårlägen, låga bullernivåer och minimerat behov av underhåll. Inga ställningstaganden görs huruvida ballast- eller ballastfria spår är att föredra men varnar samtidigt för riskerna med att ballast kan bli instabil vid höga vibrationsnivåer. Detta kan möjligen lösas med vibrationsdämpande mattor.

3 Asfalt som konstruktionsmaterial

Nedan ges en kortfattad beskrivning av asfalt av intresse för användning i banöverbyggnader. I bilaga 4 ges en mer detaljerad beskrivning.

Asfalt är ett kompositmaterial som främst består av ballastmaterial och bitumen. I asfalt kombineras stenmaterials och bitumens goda egenskaper. Genom att förändra sammansättningen kan asfaltens egenskaper optimeras för att uppfylla krav som ställs inom olika användningsområden. Ibland kan det vara både tekniskt och ekonomiskt gynnsamt att förbättra asfaltens egenskaper genom modifiering av de ingående beståndsdelarna och/eller inblandning av tillsatsmedel i asfalten, så som fibrer, polymerer, vidhäftningsmedel och överskottsprodukter. Härmed kan asfalt i princip skräddarsys för olika applikationer och för specifika krav såsom jämnhet, ljushet, buller, styvhet, flexibilitet, stabilitet, slitstyrka, utmattning, vattenkänslighet, flytegenskaper och åldringsbeständighet. Tillsatsmedel kan även användas i avsikt att kostnadseffektivisera produkten samt möjliggöra potentiella funktionella egenskaper som till exempel bullerreduktion.

Ballastmaterial till asfalt i bärande funktion bör ha liknande egenskaper som ballast i obundna bärlager. Ballastmaterialet ska vara krossat (ej naturgrus som i betong) och uppvisa goda egenskaper ifråga om deformationer och hållfasthet. Skillnaden i verkningssätt är dock stor mellan asfalt och obunden ballast eftersom bitumenet låser fast stenmaterialet. Obundna ballastmaterials egenskaper är bland annat utpräglat spännings- och vattenhaltsberoende. Det är här viktigt att poängtera att deformationerna dels är elastiskt återgående (resilienta), dels kvarstående plastiska (permanenta). Asfalt däremot är visserligen till del spänningsberoende, men framför allt beroende av hur väl låsningen i stenmaterialet förstärks av bitumenet.

I Sverige har vi förhållandevis god tillgång till mycket bra stenmaterial. Men eftersom ballastmaterial är en icke förnyelsebar naturresurs är det angeläget att bruka det med förnuft. För en hållbar naturresurshushållning gäller det att inte använda ballastmaterial med bättre egenskaper än vad som erfordras.

Även om bindemedelshalten i en asfaltbeläggning bara är ca 4-7 viktsprocent påverkar bindemedlet asfaltens egenskaper i stor utsträckning. Bindemedlet ska hålla samman stenmaterialet och bidra till den lastbärande förmågan hos asfalten, men samtidigt ge nödvändig flexibilitet så att inte sprickor uppkommer. Dessa krav ska uppfyllas vid såväl sträng vinterkyla som varma sommartid. Dessutom ska bindemedlet vara tillräckligt mjukt vid höga temperaturer så att asfalten kan läggas ut. Det är även viktigt att bindemedlet kan behålla sina goda egenskaper under sin livscykel, att det inte åldras.

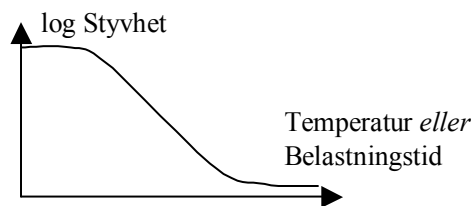
Bituminösa bindemedel för asfaltbeläggningar är högförädlad material som i huvudsak kommer från destillation av råolja. Beroende av ålder och betingelser vid råoljans bildande kan den ha mycket varierande sammansättning. Genom successiva destillationer och tekniska processer kan önskad bitumenkvalitet framställas. För beläggningens ändamål framställs vanligen ett mjukt och ett hårt bindemedel vilka senare kan blandas för att erhålla mellanliggande kvaliteter. Under senare

år har det också blivit vanligare med så kallad bland-bas bitumen vilket har sitt ursprung från destillation av en blandning av olika sorters råolja eller en blandning av olika bitumen framtagna ur olika råolja.

Vid hög temperatur och/eller lång belastningstid är bitumen mjukt och asfaltens respons beror mest på dess stenmaterial. Omvänt, vid lägre temperatur och/eller kortare belastningstid beror styvheten mer på bitumenet, men även i detta fall är stenmaterialet viktigt för asfaltens deformationsegenskaper. Beroende på bitumenets temperatur och belastningstid kan asfaltens respons beskrivas antingen som elastisk, viskoelastisk eller elasto-plastisk (som stenmaterial). Vid normala utetemperaturer är asfaltmaterials egenskaper att betrakta som viskoelastiska. Med viskoelasticitet menas att responsen dels är elastisk (dvs. deformationen är återgående) och dels viskös (dvs. responsen beror av deformationshastigheten). Viskoelasticitet ger asfalt i spårkonstruktioner ett antal fördelar jämfört med ren makadam, men även nackdelar. Förutom den ökade anläggningskostnaden kan deformationerna i asfalt öka om asfalten proportionerats fel, särskilt vid låg tåghastighet och hög halt av bitumen. Det är dock inte något problem att producera asfalt med likvärdiga eller bättre egenskaper än makadam i detta avseende. Deformationer från tåg framförda i normala eller låga hastigheter har hittills inte rapporterats ge upphov till skador. De potentiella fördelarna med viskoelastiska material utsatta för snabba belastningar är flera. Genom materialets viskoelastiska natur sker en viss dämpning i materialet. Denna dämpning har visat sig till viss del kunna reducera vibrationer alstrade av tåg [17]. Asfaltens lastspridande förmåga är också mycket god vid snabb belastning. En annan fördel är att asfalt är relativt enkelt och snabbt att lägga ut vid hög temperatur, vilket innebär att det kan börja belastas så fort temperaturen har sjunkit till 30-40°C.

Genom asfaltlagrets goda lastspridande förmåga i kombination med asfaltlagrets vattentäta egenskaper kommer underliggande ballastmaterial att utsättas för betydligt lägre spänningsnivåer och uppvisa bättre och jämnare materialegenskaper jämfört med ballastspår. En annan skillnad är kraven på utförande. För asfalt för järnvägsändamål ställs betydligt högre krav på jämnhet än för vägbeläggningar. I Tyskland nämns jämnhetskrav på $\pm 2\text{mm}$ (på en sträcka av 4m). Detta är möjligt att uppnå med moderna maskinstyrningssystem [18]. Vidare ställs höga krav på bankroppens styvhet och dess variation. Homogena egenskaper kan säkerställas genom höga krav på tillverkning, transport och framförallt utläggning och packning.

Proportionering av beläggningar för järnvägsändamål följer samma metodik som för vägbeläggningar. Det finns dock ett antal faktorer som särskilt måste beaktas. Livslängden för asfalt i banöverbyggnader måste vara betydligt längre än för vägändamål. I Tyskland förordas en livslängd upp mot 60 år. För att klara detta krävs att beläggningen proportioneras tätare och med en hög bindemedelshalt för att varken oxidation eller vatten skall inverka menligt. Tätare massor med ett lågt hålrum på ca 1-3% klarar åldring bättre vilket leder till en förbättrad livslängd med avseende på utmattning och deformation. En annan skillnad är tillåtna axellaster. För vägar tillåts i Europa axellaster upp mot 13ton vilket resulterar i ett kontaktryck mellan däck och beläggning på upp mot 900kPa. Största tillåtna axelast för tågfordon är upp mot 30ton vilket resulterar i ett kontaktryck upp mot 300kPa mellan slippers och beläggning. Således är belastningen från tåg endast en tredjedel jämfört med belastningen på vägar. En annan faktor att beakta är asfaltens temperaturberoende. Uppmjukning av asfalten sommartid vid starkt solsken kan leda till problem då den används som beläggning på väg. I banöverbyggnader utsätts inte asfalten för direkt solljus och temperaturen reduceras kraftigt av ovanliggande material (ex sliprar, bullerskydd och ballast mm). Styvhet hos asfalt vid varierande temperatur eller belastningstid beskrivs principiellt i figur 3.1.



Figur 3.1 *Principiell variation av styvhet med avseende på temperatur eller belastningstid.*

Inom vägbyggnad har utvecklingen under de senaste 40 åren gått från empiriska till analytiska dimensioneringsmetoder, vilka baseras på fundamentala teorier kring materialens beteende under last och klimatpåverkan. Eftersom teorierna är generella och i hög grad oberoende av yttre förutsättningar är de möjliga att applicera på problem där helt andra lastfall dominerar. Det finns därför en stor potential för utnyttjande av erfarenheterna från vägdimensionering vid utveckling av dimensioneringsmetoder för banöverbyggnader.

En analytisk dimensioneringsansats tillämpar allmän ingenjörsvetenskap och använder konstitutiv analys för att beräkna överbyggnadens respons, dvs. spänningar, töjningar och deflektioner, för specifika yttre förutsättningar. Responserna är en funktion av belastning, typ av struktur samt ingående material mekaniska egenskaper. Nedbrytningsförloppet beskrivs vanligen genom empiriska relationer mellan observerat beteende hos ”verkliga” överbyggnader och beteende uppmätt hos provkroppar i laboratorium. Den mätta responsen måste via någon lämplig korrelationsfaktor anpassas till verklig nedbrytning i överbyggnaden. Med hjälp av förfinade analysverktyg tillförs ny kunskap om hur vägöverbyggnader fungerar och bryts ner under trafikbelastning. Detta medför att nedbrytningskriterier kan vidareutvecklas så att flexibla överbyggnader kan dimensioneras och förstärkas på ett mera optimalt sätt. Pågående forskning med mer realistiska materialmodeller har kunnat visa att dessa har förmågan att beskriva och förklara hur en väg nedbryts på ett bättre sätt än traditionella metoder [19, 20].

4 Spårkonstruktioner med asfalt

Asfalten kan i princip ingå i överbyggnaden på tre sätt:

- I underkant bärande lager, ”Underlayment” (UL)
- Under sliprarna, ”Overlayment” (OL)
- Ballast och underballast ersätts helt med asfalt, ”Full-depth”

De tre sätten att använda asfalt i överbyggnaden ger förbättrad lastöverföring men verkningssättet skiljer sig åt. Underlayment söker skapa ett skikt med förmåga att ta upp påkänningar i överbyggnaden, med huvudsaklig tanke på dragpåkänningar. Därigenom styvas överbyggnaden upp utan att möjligheterna till konventionellt underhåll genom riktning och ballastrening går förlorade. Overlayment och Full-depth-konstruktioner syftar till att, i likhet med ballastfria konstruktioner av betong, ge stabilare spårålaggen med högre precision och förhindra krossning av ballastmaterialet. Ballastfria spårkonstruktioner kan genom sin täthet hindra vatten att tränga ned i spårkonstruktionen, vilket bidrar till ökad bärighet hos underliggande lager. Gemensamt för ovanstående konstruktionstyper är att de kan minska underhållsintervallet samt underhållskostnaden. I följande avsnitt ges mer detaljerade redogörelser för konstruktionerna.

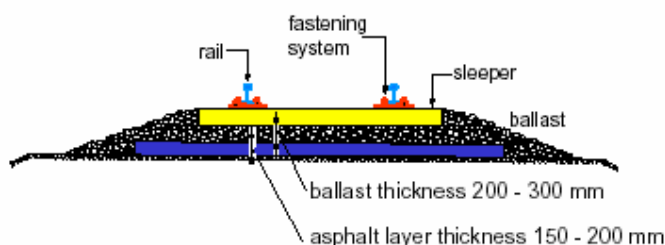
4.1 Underlayment

Typiska konstruktioner med asfalt en bit ned under sliprarna, sk. Underlayment (UL) visas i figur 4.1. I litteraturen återfinns exempel på användning av UL i Italien, Finland och USA. I USA har Asphalt Institute tagit fram en standard för utformning av dessa konstruktioner [21]. I USA finns

tusentals objekt som utförts som UL [22], där merparten tillkommit efter 1980. En anledning till det stora antalet objekt kan vara att asfalt anses vara bra vid exempelvis avsnitt med dålig bärighet och under växlar med stora lokala påfrestningar. Övriga fördelar som nämns är förhindrande av vattendnedträngning i undergrunden samt förbättrad lastspridning och reduktion av vibrationer. Med en UL-konstruktion undviks flera av de nackdelar som Overlayment och Full-depth har i fråga om underhåll men har också sina fördelar i att ballastens fjädrande effekt finns kvar och på så sätt undviks dyrare konstruktioner med gummidämpning. En annan fördel med UL är att ballast och undergrund separeras och pumpning av finmaterial från undergrunden upp i ballasten undviks.

Enligt Asphalt Institute [21] bör asfalten ligga minst 0.5 m utanför slipers. Asphalt Institutes rekommendationer för tjockleken på asfaltlagret varierar mellan 75 och 150 mm beroende på undergrundens bärighet. Minsta tjocklek på det obundna ballastlagret har av Asphalt Institute satts till 125 mm så att konventionella metoder för spårunderhåll kan användas. För dimensionering har man i USA tagit fram programmet KENTRACK [23]. De resulterande konstruktionerna har jämförts med uppföljningar i fält.

I Italien och Japan använder man reducering av buller som argument för användning av asfalt i järvägsöverbyggnader. I Italien har försök gjorts med underlayment där man hävdar att signifikant reduktion av buller och vibrationer erhållits [11]. Här undersöks även om inblandning av gummigranulat i asfalten ytterligare kan reducera bullernivåerna.



Figur 4.1 Exempel på underlayment-konstruktion. Efter [24].

I Finland har ett par UL-konstruktioner med en asfalt tjocklek på 150mm utförts sedan början av 1990-talet [25]. Nyligen har ett nytt forskningsprojekt påbörjats som skall utvärdera de Finska försöken. Enligt denna forskningsgrupp finns ett antal positiva erfarenheter med denna konstruktionstyp. Nya teststräckor kommer eventuellt att utföras.

En naturlig farhåga med UL borde vara att krossningen av ballasten kan öka eftersom ballasten befinner sig på ett hårdare underlag än annars. Några belägg för detta skulle ha uppkommit har inte påträffats i litteraturen.

4.2 Overlayment

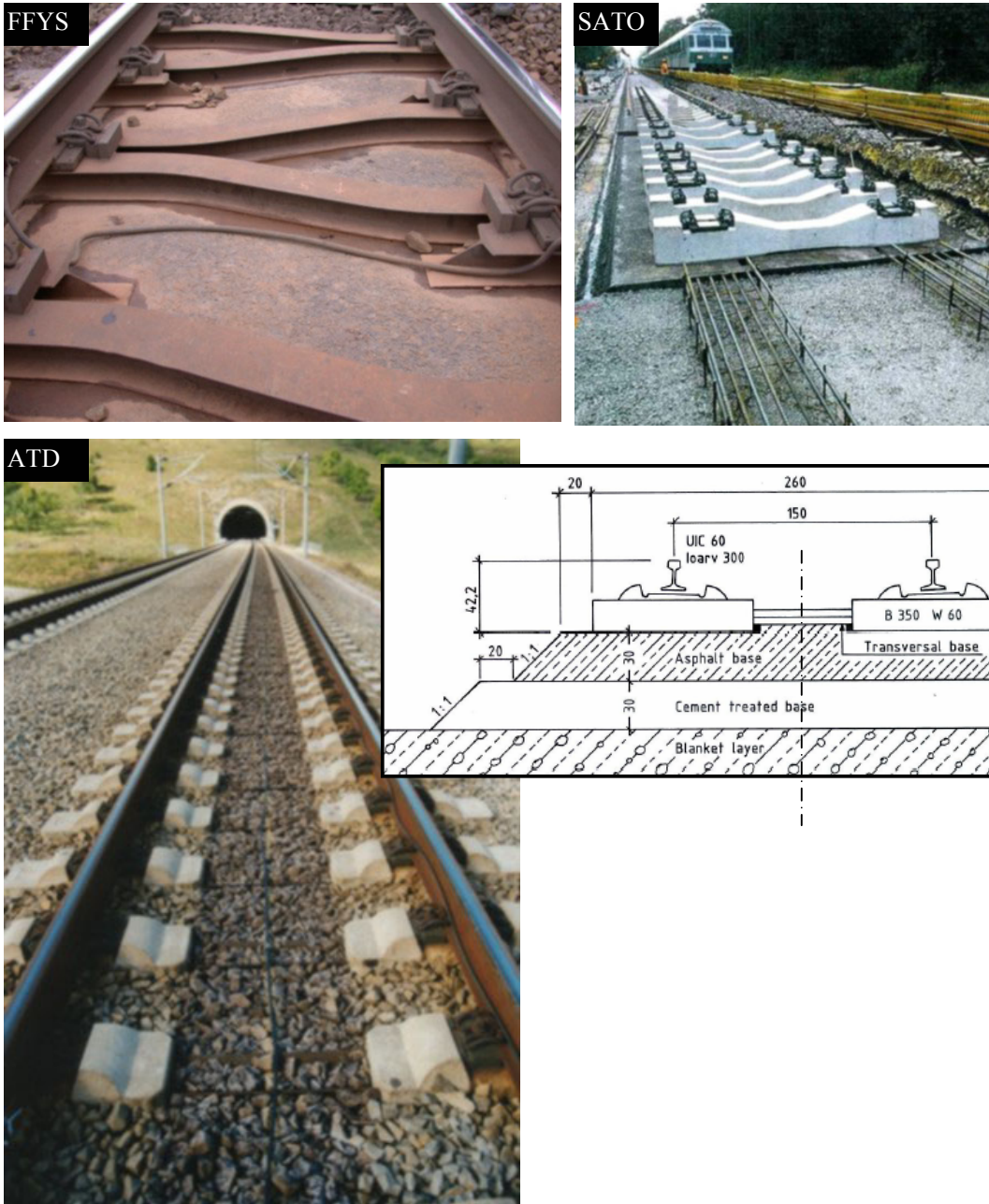
Med Overlayment menas att slipers vilar direkt på asfalt som i sin tur vilare på ett tunnare lager makadam. Exempel på Overlayment för järvägar har endast återfunnits i anknötning till tyska och japanska spårkonstruktioner. I Full-depth konstruktionen utgörs däremot hela bärlagret av asfalt. Uppgifter om denna variant har påträffats i källor från USA och har där använts företrädesvis under växlar men även på partier med dålig bärighet [22, 23]. En tredje grupp Overlayment-konstruktioner är de som används för light rail och spårvägar. Dessa tas upp separat i nästa avsnitt.

I de tyska konstruktionerna vilar i regel slipers av betong eller stål på asfalt som i sin tur bärs upp av ett cementbundet lager. Spårkonstruktionens elastiska respons under last är av stor betydelse för slitage och buller. Gummi under slipers eller räl kan behövas för att ersätta makadamens fjädrande effekt.

Deutsche Bahn kräver att en överbyggnad med asfalt ska ha minst 30 cm asfalt och 30 cm hydrauliskt bundet material för att klara påfrestningarna från höghastighetståg. Denna regel grundar sig på Professor Eisenmanns arbete vid Universitetet i München i mitten på 80-talet, vilket betyder att de tyska konstruktionerna med asfalt i stora drag är låsta i sin utformning, men uppvisar vissa skillnader i detaljutformningen. Då man funnit att kraftiga betongslipers fungerar bäst kvarstår låsningen mellan slipers och asfalt som den viktigaste parametern att variera vid framtagandet av nya konstruktioner i Tyskland. Låsningen förhindrar slipers, och därmed spåret, att förflytta sig i längs- och tvärled.

I exemplen på tyska konstruktioner som visas i figur 4.2 ser man utvecklingen av slipers och olika lösningar för att låsa slipers till asfalten. I FFYS (Feste Fahrbahn mit Y-Stahlschwellen – dvs. ballastfritt spår med Y-formade stålslipers) användes svängda stålslipers som var fastsatta i asfaltbärlagret med ankare. Dessa ankare var i sin tur fastsvetsade i 20 mm breda stålband liggande mellan två lager asfalt. Konstruktionen hade flera fördelar på kort sikt men tyvärr allvarliga nackdelar såsom extra lagerhållning av specialdetaljer, svår och dyr tillverkning och att sprickor uppkom i asfalten runt ankarfästena. Efter lärdomarna från FFYS utvecklades SATO där slipers istället fästes i ett fräst spår i asfalten som därefter fylldes med fogmassa. Stålslipers fick dock senare överges p.g.a. Deutsche Bahns motvilja mot att lagerhålla specialdetaljer till bl.a. rälsfästena. Istället valdes tunga betongslipers. SATO fick två efterföljare i Walter och Wayss & Freitag. Skillnaderna i dessa konstruktioner jämfört med SATO ligger främst i låsningen av slipers mot asfalten. Walter använder sig av en ca 50 cm lång stålbulst som bäddas in i elastisk material i ett hål med diameter 28-31 mm som löper genom slipers och nästan hela asfaltlagret. Man befarar dock att 30 mm:s hål är för lite för att undvika utvidgning av hålet, vilket i så fall kommer att påverka spårslaget. I Wayss & Freitags konstruktion vilar slipers på ett lager elastisk asfaltmastix som även låser och dämpar vibrationer.

ATD (Asphalt Tragschicht mit Direktauflagerung der Schwellen) är den konstruktion man byggt mest av hittills. Den första sträckan utfördes 1993 på linjen mellan Würzburg och Frankfurt. Slipern bestod ursprungligen av två betongblock med kraftiga stålstag emellan. I ATD konstruktionen lades förutom de trettio centimetrarna asfalt som bärlager även fyra centimeter mellan betongblocken. På detta sätt låstes slipers i sidled med en relativt stor kontaktyta mellan betong och asfalt. Nackdelen med tudelade slipers var att makadamen kilas fast i ovkant mellan betongblocken så att slipers deformeras. Elasticitet och vibrationsdämpning hos konstruktionen upprätthölls genom gummiinlägg under räl samt gummiduk under slipers.



Figur 4.2 Bilder på de tyska konstruktionerna FFYS, SATO och ATD.

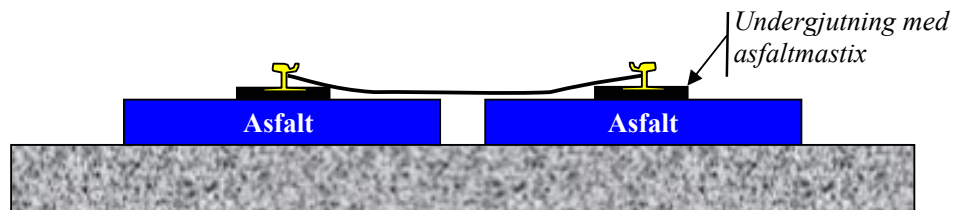
Vid spårriktning sker underhållet så att spåret och slippers lyfts varefter en undergjutning med asfaltmastix görs.

4.3 Spårvägar

Ballastfria spårkonstruktioner är väl etablerade i spårvägssammanhang. Anledningen är att effekterna av spårunderhåll är stora på trafiken. Därmed är mycket vunnet om behovet av underhåll och därmed avstängningstider kan reduceras. I Sverige förekommer spårkonstruktioner

med asfalt som bärlager i Göteborg, Stockholm och Norrköping. På kontinenten finns en mängd exempel.

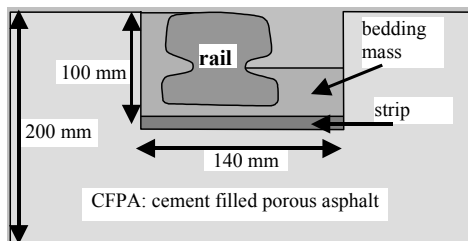
Spårvagnars förhållandevis ringa tyngd möjliggör placering av rälen på bärlagret utan mellanliggande slipers. En produktionsteknisk fördel är att rälsen kan läggas direkt på bärlagret av asfalt (vanlig eller modifierad AG) och därefter riktas. Rälsen fixeras sedan i sin position genom undergjutning med asfaltmastix (gjutasfalt utan grövre stenfraktioner). Stag mellan rälen hjälper också till att fixera läget.



Figur 4.3 Typisk överbyggnad för spårvägar med asfalt som bärlager. Material tillkommer mellan och vid sidorna av rälsen, t ex bärlager och slitlager för fordonstrafik.

Idag riktas särskilt intresse åt buller- och vibrationsreducerande åtgärder i gatumiljö. Vanliga lösningar innefattar gummi kring rälfot eller mellan över- och underbyggnad, men även asfaltmaterial lyfts fram som alternativ. En mjukare infästning av rälfoten ger minskat buller, minskade vibrationer och minskade dynamiska krafter från spårvagnar. Buller, vibrationer och dynamiska laster är givetvis i första hand faktorer som påverkar t ex miljö (boende) och slitage på spår och fordon, men även de negativa effekterna på främst obundna material i spårkonstruktionen i kombination med högt vatteninnehåll lyfts fram som argument för behovet av begränsande åtgärder.

I Holland provas för närvarande cementstabiliserad asfaltbetong som bärande lager i spårvägskonstruktioner [26]. Cementstabiliserad asfaltbetong består av en öppen asfalt som fyllts med cementpasta efter läggning så att porerna tätats och går under flera benämningar, t ex densiphalt och CFPA (Cement Filled Porous Asphalt). Materialet kännetecknas av relativt hög styvhet med viss flexibilitet. Rälen omsluts av ett flexibelt material (bedding mass). Detta material ger rälsen ett kontinuerligt och stabilt stöd, samtidigt som buller och vibrationer reduceras. Konstruktionen benämns ERIA (Embedded Rail In Asphalt).



Figur 4.4 Tvärsnitt av en ERIA/CFPA konstruktion.

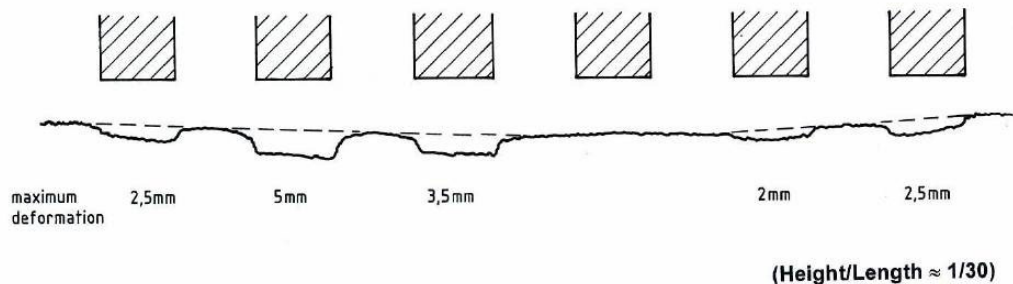
5 Erfarenheter

Enstaka försök med asfalt i ballastfria spår har gjorts i ett flertal länder världen över men bara i tre länder är erfarenheterna så stora att slutsatser om funktionen kan dras. Dessa länder är Tyskland, Italien och USA. Japan har sedan länge varit ett föregångsland inom ballastfria spårkonstruktioner av betong, men även här har intresset vaknat för asfalt. Nedan följer korta redogörelser för dessa respektive länders erfarenheter.

5.1 Tyskland

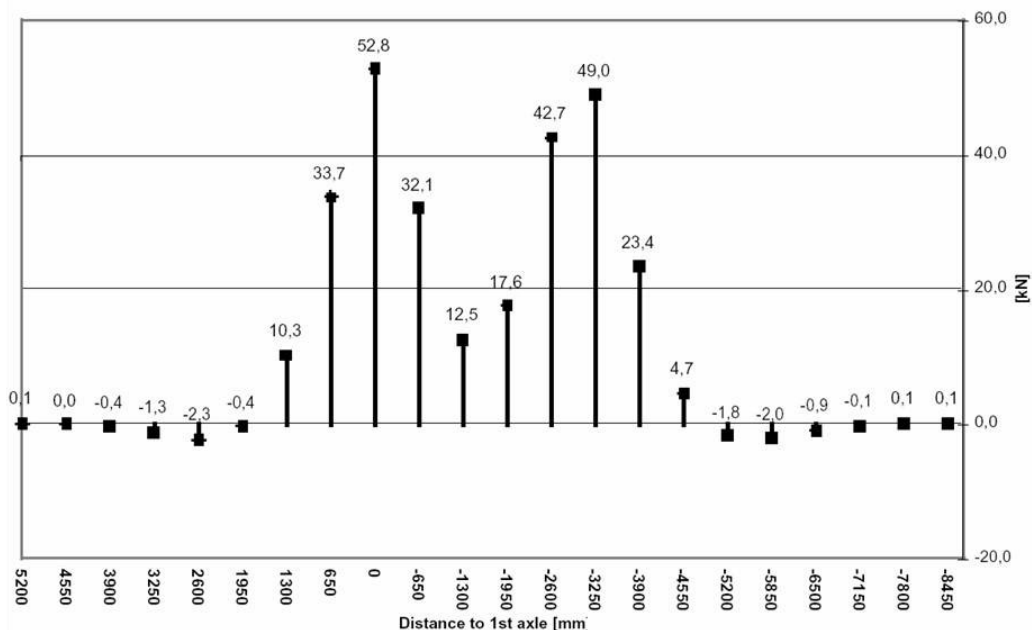
I Tyskland föredras ballastfria spårkonstruktioner eftersom fördelarna i det reducerade underhållet anses överväga [8]. Detta synsätt gör de nyare tyska undersökningarna unika. Tyskland tycks vara det enda landet i världen där Overlayment används som ett alternativ. I bilaga 2 anges de konstruktioner som hittills godkänts för bruk eller försök i Tyskland. Ett av syftena med Overlayment är att förbättra spårlägesutvecklingen. Spårlägesutvecklingen tros också vara god för nya asfaltkonstruktioner. Hittills har mätningar gjorts på 8 år gamla konstruktioner [27]. Trenden efter 8 år är lovande. Spåren har i sin helhet blivit jämnare eftersom vissa deformationer tillåts.

Jämförelser av för- och nackdelar mellan asfalt och betong är mycket komplicerade. En nackdel är naturligtvis att asfalt deformeras något, vilket inte betong gör i någon större utsträckning. Å andra sidan kan initiella ojämnheter, t ex till följd av skillnader i sliprarnas höjd utjämnas över tiden så att jämnare belastning erhålls, vilket är positivt. I figur 5.1 visas asfaltens ytprofil med fördjupningar där slipers legat. Variationerna i groparnas djup förklaras med variationer i höjd på slipers, infästningar m.m., som lett till varierande tryck på asfalten. Trycket har under trafiklast utjämnats (relaxation). Problem med instängt vatten under slipers kan uppkomma som en direkt följd av denna plastiska utjämning. Det vatten som ansamlas i fördjupningarna under slipers kan därmed pumpas av trafiklast och leda till erosion. Detta problem har lösts med geotextilduk under slipers.



Figur 5.1 Gropar av varierande djup i asfalt Overlayment. [28]

De tyska erfarenheterna visar med tydlighet att infästningen av slipers i asfalt kan leda till problem om det inte beaktas noga. De nyare konstruktionerna tros i detta avseende vara väsentligt mycket bättre än sina föregångare. För att minska påkänningarna i infästningarna är det av största vikt att avståndet mellan slipers är tillräckligt kort så att inga lyftkrafter uppkommer vid överfart. Figur 5.2 ger exempel på lastfördelning mellan slipers vid överfart.



Figur 5.2 Kraft överförd mellan räl och slippers vid överfart av två axlar. [28]

5.2 Italien

De första erfarenheterna från spårkonstruktioner med asfalt i Italien är från början av sjuttioalet. Sedan dess har 370 km Underlayment (underballast av asfalt) lagts (ca 600 000 m³). Ytterligare ungefär 1 200 km planeras för de närmsta åren [11]. Resultaten anses tillfredsställande och har visat hur asfalten kan bidra till stabilare spåråläge, särskilt vid kritiska avsnitt såsom växlar, expansionsfogar vid övergångar mot broar och tunnlar eller andra snabba förändringar i grundläggningsförhållanden.

Asfalten läggs med vanlig utrustning vilket innebär att det geografiskt finns ett utvecklat nät för logistik av utrustning och material. Vidare kan fordon trafikera asfaltytan redan några timmar efterläggning. Jämfört med cementbaserad underballast har asfalt fördelar genom att

- sprickor är mindre sannolika,
- ytan ej behöver skyddas med membran eller spray,
- tiden som åtgår för härdning är kortare, och
- asfalt är vibrationsdämpande, vilket är positivt ur miljösynpunkt.

Försök med modifierat bitumen har visat lovande resultat med avseende på ytterligare reducering av buller och vibrationer [11]. Även modellering av dynamiska laster hos Underlayment-överbyggnader har gjorts där hänsyn tagits till den förstyvande effekt som modifieringen ger [29]. De dynamiska lasterna till följd av ett styvare lager i överbyggnaden konstateras vara negligerbara. Resultatet förklaras av att makadam och rälfot kan deformeras tillräckligt. Ur denna synvinkel är därmed responsen från en Underlayment-konstruktion att betrakta som likvärdig en konventionell ballastkonstruktion. Försök med asfalt modifierat med gummigranulat för att ytterligare öka vibrationsdämpning pågår för närvarande [30] och visar bl.a. att den dissiperade energin (se figur 3.9) ökar med ökande mängd gummigranulat [31].

5.3 Japan

I Japan har man sedan länge byggt ballastfria spårkonstruktioner i betong, främst på snabbspår, Shinkansen. Syftet har bl.a. varit att minska underhållsbehovet. En nackdel med ballastfria spår i betong är ökat buller. Momoya et al. uppskattar ökningen till ungefär 5 dB(A) [32]. En annan nackdel är de höga anläggningskostnaderna. Dessa nackdelar har föranlett japanerna att finna nya konstruktionslösningar där asfalt Overlayment är ett lovande alternativ.

En 20 meter lång provsträcka har byggts som i sin tur består av tre delsträckor med olika tjocklek på asfaltlagret: 100, 200 och 300 mm. Delsträckorna har sedan jämförts med en konventionell ballastkonstruktion. Konstruktionerna belastades statistiskt med en last på 80 kN och dynamiskt med en last på $60 \text{ kN} \pm 30 \text{ kN}$ (7 Hz sinusvåg). I det statiska testet var skillnaderna i deformationer inte särskilt stora. I det dynamiska testet däremot var den positiva inverkan av asfaltlagret påtaglig. Sättningshastigheten hos konstruktionen med 100 mm asfalt var vid dynamisk belastning ungefär 1/5 av sättningshastigheten för ballastkonstruktionen. För konstruktionerna med 200 och 300 mm asfalt var motsvarande sättningshastigheter 1/30 och 1/40 av ballastkonstruktionens [32].

5.4 USA

Asfalt i spårkonstruktioner har utvärderats i ett flertal projekt, främst utförda av Professor Rose vid Universitetet i Kentucky. I en artikel från år 2000 summeras tjugo års erfarenheter av asfalt [22]. Rose skriver att "tusentals" Underlayment har lagts under de senaste tjugo åren och att takten ökar eftersom långtidsprestanda och ekonomiska utvärderingar indikerar dess fördelar. Främst används Underlayment på sträckor med svåra geotekniska förhållanden eller där man vill minska behovet av underhåll. Andra viktiga användningsområden för Underlayment är i vägövergångar, både vid nybyggnad och ombyggnad, och under växlar. Asfalt har dessutom använts för utjämning av tunnelgolv. Asfalten kan i detta fall ge god jämnhet,

Asphalt Institute har tagit fram riktlinjer för proportionering och dimensionering av asfalt för spårkonstruktioner. Här anges bindemedelshalten till ca 0.5 % över vad som anses normalt för bärlager i vägkonstruktioner. Rose konstaterar att asfaltens täthet, in-situ hålrums halt mindre än 5 %, reducerar inverkan av åldring. Prover från 15, 16 och 29 år gamla konstruktioner visar inga signifikant förhöjda styvheter hos bindemedlet. Den stora positiva inverkan av lågt hålrum är känd sedan tidigare i vägsammanhang.

5.5 Storbritannien

Constable studerade 1966-1967 hur belastningen på terrassen kan minskas om asfalt används i Underlayment [33]. Tryckceller mätte spänningar i vertikal- och horisontal samt skjuvspänningar. Med 76 mm asfalt reducerades spänningen på terrassen med 22 % och med 153 mm asfalt 43 %. Dessa mätningar gjordes under långsamma belastningar och man poängterar att spänningsreduktionen hade blivit ännu större under verklig trafik (till följd av asfaltens viskoelastiska respons).

5.6 Sverige

De svenska erfarenheterna begränsar sig främst till spårvägar byggda under 90-talet och senare. Ett försök gjordes vid Simonstorp i Östergötland 1964 med asfalt i en järnvägsöverbyggnad. Erfarenheterna från det senare försöket ter sig positiva men försöket var begränsat och några egentliga slutsatser är svåra att dra [3]. När det gäller spårvägar är det ännu för tidigt att säga om asfalt varit bra eller inte. Hittills har inget underhåll varit nödvändigt. På kort sikt kan man se att buller och slitage ökar hos de ballastfria konstruktionerna om inte spåren bäddas in med skikt av dämpande material. Asfalt verkar bättre än betong i detta avseende. En mängd konstruktionslösningar förekommer för att ta upp och dämpa stötar och vibrationer. Dels kan

dämpande skikt placeras under rälen eller runt hela överbyggnaden. Bullerfrågorna har stor vikt eftersom spårvägar i regel ligger i bullerkänsliga tätortsområden. Man kan därmed förvänta sig ytterligare utveckling av nuvarande spårkonstruktioner för att reducera buller.

I Sverige tycks det råda enighet om att betong eller asfalt krävs i bärlager för att reducera behovet av underhåll på spårvägar. Ballastfria spår för spårvägar är således redan en etablerad konstruktionstyp.

Från spårvägshåll konstateras att det i nuläget finns brister i kunskaperna om hur spårkonstruktioner med betong och asfalt fungerar rent tekniskt, t.ex. hur konstruktionerna skall dimensioneras med avseende på bärighet, hur buller uppkommer och effektivt kan dämpas, samt hur olika material kan kombineras utan att problem uppkommer i fogarna. På lång sikt är det viktigt att underhållsfrågorna och livslängdsproblematiken belyses [34].

6 Potential och forskningsbehov

Syftet med föreliggande rapport har varit att klargöra förutsättningarna för genomförande av ett doktorandprojekt fokuserat på asfalt i spårkonstruktioner. Arbetet har berört de ekonomiska och tekniska krav som ställs och kommer att ställas på spårkonstruktioner nu och i framtiden. Utvecklingen inom järnvägen går framförallt mot allt större axellaster, högre hastigheter samt krav på kostnadseffektiva underhållsåtgärder. Eftersom denna utveckling i stor utsträckning kommer att genomföras på befintliga banor med kombinerad person- och godstrafik kommer nedbrytningen av banöverbyggnaderna att accelerera och bidra till ökade infrastrukturellerade tågstörningar. Samtidigt väntas ökade drifts- och underhållskostnader för att vidmakthålla och säkerställa befintliga banöverbyggnaders standard och funktion. Internationella erfarenheter har visat att införandet av stabila spår med asfalt kan vara en möjlighet att tillgodose de ökande kraven då asfalt bidrar till att förbättra spårstabiliteten och lastspridningen.

De tekniska aspekterna på asfalt som konstruktionsmaterial har berörts, särskilt med tanke på användning i spårkonstruktioner. En sammanställning av aktuell kunskap om asfalt i bärande lager i spårkonstruktioner har utförts baserat på litteraturstudier samt kontakter med forskare och banhållare. Utifrån detta material avhandlas i kapitlet vilka fördelar som kan erhållas, samt behovet av forskningsinsatser.

6.1 Potential för asfalt i spårkonstruktioner

Under de senaste åren har efterfrågan på järnvägstransporter ökat. För att ytterligare öka järnvägens konkurrenskraft efterfrågas allt högre tåghastigheter och medelhastigheter samt ökad nyttolast för godstransporter (ökad axellast och ökad lastprofil). Som ett led i denna utveckling har stora investeringar i ett antal järnvägsprojekt planlagts. Snabbare tåg och större tillåtna axellaster kommer dock att ställa allt högre krav på banöverbyggnaden och dess ingående komponenter. Ökade hastigheter och ökande axellaster har visat sig ha stor inverkan på spårets nedbrytningsprocess även om alla faktorer inte är helt klarlagda. Sammantaget kommer investeringar och trafikillväxt att bidra till större framtida drift- och underhållsinsatser. Då nästan allt banunderhåll orsakar störningar i någon form i tågtrafiken kommer detta att bidra till minskad punktlighet om inget görs. Kostnaderna för underhållsåtgärder och störningar kommer till stor del bero på hur trafiken kommer att utvecklas samt vilka banstandarder och banöverbyggnader som väljs. Valet mellan ballast- eller ballastfria spår är framförallt kopplat till kostnader för byggande och underhåll. Men även andra aspekter som miljö, buller, vibrationer, klimat, utrymme, inverkar på vilken konstruktionstyp som är mest samhällsekonomisk. Ett flertal försök med ballastfria spår har uppvisat positiva resultat med avseende på förbättrad spårstabilitet och minskat underhåll. Det finns därför en stor potential för dessa konstruktionstyper allt eftersom kunskapen om ballastfria spår ökar. Det är dock svårt att direkt överföra dessa

erfarenheter till svenska förhållanden. Lokala förutsättningar och förhållanden måste beaktas innan nya tekniker, komponenter och material införs. För att kunna utvärdera dessa nya konstruktioner bör de utvärderas för svenska förhållanden med avseende på t.ex. trafikmängd, klimat, tillgänglighet till resurser, underhållsstrategier samt samhällsekonomisk nytta.

Kunskap från vägbyggnadsområdet kan bidra till nya lösningar vid utformning av framtida banöverbyggnader. Inom vägsidan har utvecklingen kommit långt och asfalt som konstruktionsmaterial är i vägsammanhang ett väl beprövat material. Kunskap och erfarenheter om proportionering, tillverkning, precisions utläggning, dimensionering och underhållsåtgärder finns tillgängliga och går att finna i t.ex. Vägverkets Allmänna Tekniska Beskrivningar ATB [35]. Vidare pågår en bred nationell och internationell forskning kring optimering, dimensionering och underhåll av asfaltkonstruktioner.

Idag finns internationell kunskap och goda erfarenheter av stabila spår med asfalt. I Sverige har vi stor kunskap om asfalt men saknar erfarenhet av stabila järnvägsspår för nordiska förhållanden. För att förändra denna situation krävs ett nationellt forskningsprojekt som kan studera och utveckla de mest lovande banöverbyggnadskonstruktionerna för svenska förhållanden. En utvärdering av befintliga spårvägskonstruktioner borde också vara av stort värde.

6.2 Underlag för doktorandprojekt

Bristen på kunskaper är ofta ett skäl till att ny teknik inte kommer till användning. Särskilt effekter på lång sikt kan vara svåra att bedöma. Följderna av felsatsningar kan ibland vara ödesdigra och det är därför ofta klokt att välja beprövad teknik istället. Denna mekanism låser teknikutvecklingen. Behovet av vissa nyckelkunskaper blir därmed nödvändiga för fortsatt teknikutveckling. Föreliggande rapport har följaktligen sökt sammanställa kunskapsläget och identifiera särskilt viktiga områden att fokusera ett doktorandprojekt på. Fördelen med ett doktorandprojekt är att det inte enbart producerar forskningsresultat utan framförallt en forskare, specialiserad på det aktuella området, som kan driva på utvecklingen i branschen under lång tid.

I rapporten har framkommit att asfalt används i en rad typer av spårkonstruktioner. Tyvärr finns väldigt lite kunskap från undersökningar av dessa. Innan asfalt används i stor skala i svenska järnvägar bör en rad områden belysas, t ex:

1. Beständighet hos asfalt.
2. Permanenta deformationer i asfalt.
3. Proportionering av asfalt optimerad för spårkonstruktioner.
4. Analys av asfaltens bidrag till bärande förmåga. Teoretiska beräkningar och optimering asfaltkonstruktioner.
5. Analys av vibrationsdämpande förmåga hos asfaltkonstruktioner (simulering och fältmätningar).
6. Analys av responsmodifierande åtgärder t ex pads.
7. Utvärdering av spårkonstruktioner med asfalt i bäringshöjande funktion, både UL och OL.
8. Utvärdering av spårvägar med asfalt.
9. Utvärdering av asfalt under övergångar och växlar.
10. Framtagning och utvärdering av metoder för dimensionering:
 - Materialmodeller
 - Nedbrytningskriterier
 - Validering av beräkningsmetoder och program.
11. Produktionsteknik
12. Underhåll av spårkonstruktioner med asfalt.
13. Kostnadsanalyser (CBA).

Undersökningar bör ta hänsyn till de nordiska ländernas specifika förhållanden ifråga om klimat, material, laster, geografi, produktionsresurser, mm., samt de framtida behoven som diskuteras i föregående avsnitt i detta kapitel. Doktorandprojekt på området bör i första hand fokuseras på s.k. Underlayment för järnvägar och spårvägskonstruktioner. Den stora fördelen med Underlayment är att konventionella metoder för spårunderhåll kan användas. Asfalt i spårvägar används redan idag i stor utsträckning och bör av denna orsak prioriteras. Overlayment kan på lång sikt visa sig mer intressant p.g.a. utsikterna till ytterligare ökad spårstabilitet.

I regel bör doktorandprojekt fokuseras inom ett snävt område för att nå ett djup där väl underbyggda kunskaper kan erhållas. Det är i detta sammanhang av stort värde om internationella kontakter av relevans kan knytas som medför att forskningsfronten kan föras med ökad bredd och djup. Kontakter med universiteten i Finland (Helsingfors), USA (Kentucky) och Tyskland (München) uppmuntras eftersom där för närvarande pågår verksamhet på området.

Doktorandprojekt kan inriktas på ett eller flera av följande områden

- Laboratiestudier av asfalt i syfte att optimera asfalt som bärlager i spårkonstruktioner
- Dimensionering och utformning av spårkonstruktioner
- Uppföljning av existerande spårkonstruktioner med asfalt avseende tillståndsutveckling, buller, vibrationer och ekonomi
- Utformning och uppföljning av provsträckor
 - Underlayment
 - Overlayment
 - Förstärkning under växlar och övergångar
- Utvärdering av produktionsteknik
- Utvärdering av metoder för underhåll

Inledningsvis bör en litteraturstudie initieras i syfte att ge ett förstärkt underlag för fortsatt arbete.

En laboratiestudie kan ha stort värde för att möjliggöra livslängder hos det bundna asfaltbärlagret på över 60 år utan alltför stort avkall på resistens mot permanenta deformationer (ofta kallade plastiska deformationer). I föreliggande rapport refereras till Asphalt Institute som tagit fram riktlinjer för proportionering. Potentialen för ytterligare förbättringar bedöms som stor. Även i anslutning till mätning och utvärdering av permanenta deformationer i asfalt i samband med proportionering finns stort behov av kunskap.

De senaste 15 åren har principerna för dimensionering av vägar svängt från erfarenhetsgrundade tabeller till ett visst mått av mekanisk analys. Därigenom har utformningen av vägkonstruktionerna blivit mindre låst. Ett liknande arbetssätt kan överföras till dimensionering av järnvägsöverbyggnader eftersom t ex material, klimatpåverkan och laster är desamma eller liknar varandra. Riktlinjer för dimensionering måste finnas till hands om asfalt ska bli gångbart i spårkonstruktioner i ett senare skede. Om relevanta kriterier för dimensioneringen fångas kan dessutom samma principer användas vid utveckling av bättre och billigare konstruktioner eller bara för ökad förståelse för ingående komponenters verkningsätt.

Buller, vibrationer och dynamiska laster stör boende och leder till ökat slitage på både spårkonstruktioner och vagnar. I Italien och Japan har positiva erfarenheter av asfalt erhållits i detta sammanhang, se föregående kapitel. En kombination av laboratieförsök och teoretisk analys bör kunna ge svar på hur spårkonstruktioner ska kunna optimeras för att minimera buller och vibrationer. Detta arbete kan inkludera asfaltmastix och gjutasfalt under slipers och rälfot.

I anslutning till ett nationellt forskningsprojekt skulle också ett demoprojekt kopplas. Fullskaleförsök skulle möjliggöra studier och uppföljning av konstruktionernas funktion. Vidare skulle information erhållas om nedbrytning och nedbrytningshastighet samt underhållsbehov för att ingå i lämplig LCC analys. Även nedbrytningsmodeller skulle kunna studeras i ett demoprojekt såsom svaga och svåra punkter som t.ex. spårväxlar. Ett doktorand projekt skulle också bidra till att öka kunskapsnivån och kunskapsförsörjning i detta område.

Ett demo-projekt ger värdefull koppling till verklig funktion och en chans att utvärdera asfaltens för- och nackdelar i praktiken. Nackdelen med att knyta demo-projekt till doktorandprojekt är den tidsbegränsning de medför. Ett doktorandprojekt pågår vanligen i fem år. I detta fall bör således minst två doktorandprojekt tillsättas, alternativt kombinera ett doktorandprojekt med ett vanligt forskningsprojekt, knyts till ett demo-projekt så att projekterings-, byggnations- och inledande bruksskedena kan dokumenteras och analyseras såväl som följas upp under ett antal år efter anläggningen(arna) tagits i bruk. En utvärdering av anläggningen vid Simonstorp i Östergötland 1964 (se föregående kapitel) skulle också kunna vara av värde. Demo-projekten skulle kunna omfatta både järnvägar och spårvägar. Exempel på aspekter som kan utvärderas i fält är

- Bärighet/lastspridande förmåga
- Spårläge och respons
- Vibrationer, buller och dynamiska laster
- Permanenta deformationer
- Uppföljning av parametrar av betydelse vid dimensionering
- Tillståndsutveckling hos växlar och övergångar
- Produktionsmetoder
- Underhållsmetoder
- Beständighet hos ingående komponenter över längre tidsförlopp, inkl. krossning av ballast i Underlayment
- Ekonomi

Demo-projekt bör utformas mycket noggrant för säkerställande av analyserbarheten vid uppföljningen. Erfarenheter från uppföljningar av vägar pekar på vikten av väl utförd produktion, dokumentering och instrumentering så att maximal mängd relevant information samlas in. Frågor som rör livslängd och prestanda bör prioriteras eftersom de är nödvändiga för att värdera ekonomin i spårkonstruktioner med asfalt och därmed av avgörande betydelse för framtida satsningar.

7 Slutsatser

Föreliggande förstudie visar att det finns ett relevant utgångsmaterial för fortsatta studier inom området spårkonstruktioner med asfalt. Laboratorietester och fältförsök indikerar att spårkonstruktioner med asfalt uppvisar tillfredsställande funktion och till med kan bidra till att vi kan öka största tillåtna axellaster och hastighet. Undersökningarna antyder även att spårkonstruktioner med asfalt har stor potential att reducera kostnader för spårunderhåll.

Underhåll av spårkonstruktioner medför stora kostnader både för banhållare och för nyttjare av spårkonstruktionen, dels i direkta underhållskostnader men framförallt i kostnader relaterade till avstängningar. Om behovet av underhåll kan begränsas är detta av stort värde och följaktligen finns en stor potential i att initiera forskning för att i framtiden uppnå ett mera kostnadseffektivt och uthålligt järnvägsnät. Då asfalt går relativt snabbt att lägga ut, och att asfaltlagret kan börja belastas så fort temperaturen har sjunkit, finns en hypotetisk möjlighet att även använda asfalt vid förstärkning av befintliga banor.

De tekniska aspekterna på forskning och utveckling inom området asfalt i spårkonstruktioner berör främst följande områden:

- Effektiva konstruktioner för broar och tunnlar
- Utveckling av spårkonstruktioner för gatumuljö
- Förstärkning av konstruktioner på undergrund med dålig bärighet
- Nya lösningar för växlar, övergångar mm.
- Utveckling av spårkonstruktioner med högre prestanda
- Utveckling av vibrationsreducerande konstruktioner
- Produktionstekniska fördelar.

Två principiellt olika konstruktioner förekommer, Underlayment, UL, och Overlayment, OL. Med UL kan nuvarande spår och underhållsmetoder användas, vilket är en stor fördel för banhållare. OL ger förmodligen större möjlighet till spårstabilitet men kräver å andra sidan särskilda spårriktningsmetoder och möjligen andra typer av slipers och infästningar. För att kunna använda asfaltspår i Sverige krävs dock att redovisade konstruktioner anpassas för svenska förhållanden.

I Sverige används för närvarande OL i spårvägar. Ett stort intresse för UL och/eller OL i järnvägar kan spåras i Tyskland, Italien, Japan, USA och Holland, men även i Storbritannien och våra nordiska grannländer pågår aktiviteter. Förutsättningarna för samarbete är därmed goda.

Sammanfattningsvis indikerar förstudien att grundförutsättningarna finns för att initiera ett forskningsprojekt på rubricerat område som motiveras av:

- lovande aktuella forskningsresultat,
- behov av ytterligare forskning, samt
- möjlig stor framtida potential.

8 Referenser

- [1] Framtidsplan för järnvägen – Åtgärder på nationell nivå 2004-2015, Banverket. 2004. (<http://www.banverket.se>)
- [2] Hedström R ”Spårkonstruktion med asfalt – en litteraturstudie” VTI-meddelande 772. 1996
- [3] Sjöholm H ”Asfalt i järnvägskonstruktioner” Shell asfaltstipendium. 1998
- [4] Hedström R ”Samband mellan trafikbelastning – banstandard - underhållskostnader” VTI-meddelande 806. 1996
- [5] Esveld C ”Modern Railway Track - 2nd” ed., MRT Productions, Delft, Holland. 2001
- [6] Selig, Waters “” (finns i Ragnars VTI 806)
- [7] Hedström R “Banöverbyggnadens investerings- och underhållskostnader” VTI-notat J17. 1993
- [8] Lechner B, Mattner L “Ballastless track structures in Germany“ European railway review, September. 1995
- [9] Darr E; Fiebig W „Feste Fahrbahn. Konstruktion, Bauarten, Systemvergleich Feste Fahrbahn – Schotteroberbau“ Schriftenreihe für Verkehr und Bahntechnik, 1. 1999.
- [10] (WHO/IARC) Boffetta P, Burstyn I, Partanen T, Kromhout H, Svane O, Langård S, Järholm B, et al. ”Cancer mortality among European asphalt workers: An international epidemiological study. II. Exposure to bitumen fume and other agents” Am. J of Industrial Medicine, Vol.43, pp.28-39. 2003
- [11] Buonanno A, Mele R, “The use of bituminous mix sub-ballast in the Italian state railways” 2nd Euroasphalt & Eurobitume congress, 2000.
- [12] Eisenmann J “Ballastless track as an alternative to ballasted track” Rail international, November, 1995.
- [13] Ando K, Miura S, Watanabe K, “Twenty years experience on slab track” QR of RTRI, Vol. 35, No. 1. Feb. 2000.

- [14] Bonomo F “Finitrici e rulli per i sub-ballast della linea Roma-Napoli” Le Strade 7-8, Italien. 1999
- [15] Huille J-P “European research for an optimized ballasted track: EUROBALT - Synthesis report” 1992
- [16] UIC “Design of new lines for speeds of 300 – 350 km/h – State of the art – First report” 2001
- [17] Buonanno A, Mele R “The use of bituminous mix sub-ballast in the Italian state railways” 2nd Euroasphalt & Eurobitume congress. 2000
- [18] Osyris – Open System for Road Information Support. (<http://www.osyris.org/>)
- [19] Lundström R “On rheological testing and modeling of asphalt mixtures with emphasis on fatigue characterisation” Doctoral thesis, Byggtvetenskap, Kungl. Tekniska Högskolan. TRITA-VT FR 04:02. 2004
- [20] Nilsson R “Fatigue of asphalt mixes – Theory of viscoelasticity and continuum damage mechanics applied to uniaxial fatigue data from laboratory tests” PhD diss. Inst. för teknik och samhälle, Lunds Universitet. 2003
- [21] Asphalt Institute “Rail Transit Construction using Hot-Mix Asphalt” Asphalt Institute, USA. 1995.
- [22] Rose J G, Brown E R, Osborne M L “Asphalt trackbed technology development – The first 20 years”, Transportation Research Record 1713. 2000
- [23] Rose J G, Huang Y H “Hot-Mix Asphalt Railroad Trackbed Systems” Proceedings of the ASME/IEEE Joint Railroad Conference, Chicago, April 1990.
- [24] Esveld C “Innovation in railway track” TU Delft. Holland
- [25] BAU1, Use of asphalt in Railway trackbeds. BAU-Projektet, Dec. 1991
- [26] Ven van de M F C “Design Calculations for Embedded Rail In Asphalt” TU Delft, Holland. 2004
- [27] Lechner B, Tekniska Universitetet i München (personlig kommunikation)
- [28] Leykauf G, Lechner B “Design of Ballastless Track Structures using sleeper panels fixed on concrete or asphalt pavements” Tekniska Universitetet i München. 2002
- [29] Giannattasio P, Caliendo C, Crispino M, Marulo F, Perneti M “Sub-Ballast Role in Dynamic Train-Track-Superstructure Interaction in High Speed Lines” World Congress on Railway Research, Paris. november 1994
- [30] Ravaioli S “Asphalt in railway applications” SITEB
- [31] D’Andrea A, Urbani L “Sub-ballast in railway constructions” Inst. för Transport och vägar, Universitetet i Rom. 2003
- [32] Momoya Y, Horiike T, Ando K ”Development of Solid Bed Track on Asphalt Pavement” QR of RTRI, Vol. 43, No. 3. Sep., 2002
- [33] Constable M H T “Asphalt Layers in railway road-bed construction” Shell International Petroleum Company Ltd. 1969
- [34] Personlig kommunikation med SL Infrateknik
- [35] ATB Väg 2003, Vägverket. 2003

Bilagor

Bilaga 1 Utdrag ur Banverkets föreskrifter Typsektioner för banan. BVH 585.31.....	33
Bilaga 2 Tabell över tyska ballastfria spårkonstruktioner.....	35
Bilaga 3 Förslag på forskningsprojekt relaterade till höghastighetståg formulerade i [15].	37
Bilaga 4 Utförlig beskrivning av asfalt som konstruktionsmaterial.....	33
Bilaga 5 Bibliografi	53

Sid. 10-11

3.1 Ballastlagrets funktion

Ballastlagret ska bära spåret och säkra dess längd- och sidostabilitet och måste därför:

- · ha stor vertikal bärförmåga
- · ha stor horisontal bärförmåga
- · vara elastisk
- · vara beständig mot slagpåverkan och mekanisk nötning
- · vara väl dränerande.

Elasticiteten är en förutsättning för lastspridning mellan sliprar, vilket minskar påkänningarna på både räler och sliprar. Ballastlagrets tjocklek påverkar i vilken omfattning lasten sprids mot underballast och undergrund.

Makadamballastens livslängd förutsätts motsvara spårkonstruktionens livslängd, det vill säga 30 - 40 år. Vid tågtrafik och underhållsarbete utsätts makadamballasten för stora belastningar som på lång sikt leder till sönderbrytning av kornen och inträngnings och nötningsfenomen vid kornens kontaktpunkter.

För att säkerställa makadamballastens funktion under livslängden erfordras:

- · tillräcklig bredd på fyllningen
- · tillräcklig tjocklek på fyllningen
- · hårda bergmaterial
- · hög inre friktion
- · stor hålrumsvolym
- · kantiga korn.

Då makadamballastens egenskaper är viktiga för spårkonstruktionens funktion under livslängden är det nödvändigt att tillverkning, lagring och leverans av ny makadamballast kvalitetssäkras. Detta kan göras genom tillämpning av kvalitetsrutiner som inkluderar bland annat leverantörens egenkontroll av att krav på material- och produkttegenskaper är uppfyllda samt att beställaren utför mottagningskontroll av levererat material, se BVF 585.52 ”Makadamballast för järnväg” inklusive ABM 92 - BALLAST.

Sid. 12

3.4 Utformning av ballastlager

Ballastlagrets tjocklek under underkant sliper är normalt 0,3 m. Vid rälsförhöjning gäller måttet under innerrälen. För banor som planeras för banstandard med största tillåten axellast (stax) 30 ton eller för höghastighetstrafik med största tillåten hastighet (sth) 250 km/h kan åtgärder erfordras för att öka elasticiteten vid styv undergrund. Detta kan vara aktuellt vid broar, tunnlar eller terrassyta av berg och kan ske med exempelvis ballastmattor, som förläggs under ballastlagret.

Vid broar med genomgående ballastlager ökas tjockleken på ballastlagret till 0,4 m. För att öka elasticiteten kan också ballastmattor, som förläggs under ballastlagret, användas. Dessa kan också

fungera som buller/vibrationsdämpare. Ballastskuldran ges normalt en bredd av minst 0,40 m. Det innebär att den ballasterade ytans bredd i rakspår normalt är 3,3 m för betongsliper och 3,4 m för träsliper. I kurvor med horisontalradie $R < 500$ m i skravfritt spår ökas ballastskuldrans bredd till 0,55 m. Då $R < 400$ m utförs dessutom en överhöjning av ballastskuldran med 0,1 m i yttersträng. Makadamballastens släntlutning ska vara 1:1,5 i såväl rakspår som kurvspår.

Bilaga 2 Tabell över tyska ballastfria spårkonstruktioner

lfd. Nr.	Bauart der FF	Entwicklung/Antragsteller	Asphalt-Beton	Zul. zur Betr. ergr.	Allg. Zulassung	Bemerkung	erste Zulassung	Zulassung durch/ EBA-Zulassg. Nr. 1)
Kompakte Lösungen								
1	Rheda im Bf Rheda	TU München ²⁾	B	V		einbeton, Gleisrost auf BTS, Schw. B70V5, Bef. loarg 180	1972	DB
2	Rheda Karlsfeld	DB	B	V		in FBP einbetonierter Gleisrost, Schw. B70V5, loarg 180	1977	DB
3	Fertigteiltragplatte (FTP)	Dyckerhoff & Widmann	B	V		unterrossene FTP, Fugen vorgespannt, loarg 180	1977	DB
4	Fertigteiltragrost (FTR)	Dyckerhoff & Widmann	B	V		unterrossener FTR, Fugen vorgespannt, loarg 180	1977	DB
5	Rheda Einmalberg-/Mühlbergtunne	Dyckerhoff & Widmann	B	V		System Rheda, Schwelle B70V7, Schienenbef. loarg 20;	1985	DB
6	SBV	Deutsche Asphalt	A	V		Schw. B300 mit loarg 300 mit Gußasphalt vergossen	1988	DB
7	Fertigteiltrahmen	Deutsche Asphalt	A	V		Fertigteile mit Gußasphalt vergossen	1988	DB
8	Züblin Monoblockschwelle	Züblin	B	V		Schwellen B305 in frischen FBP-Beton eingerüttelt	1988	DB ³⁾
9	Rheda Sengenberg	Dyckerhoff & Widmann	B	V		System Rheda mit Schwellen B301/302 im Trog	1989	DB ³⁾
10	Züblin Zweiblockschwelle	Züblin	B	V		Schwellen B360 ⁴⁾ in frischen FBP-Beton eingerüttelt	1993	DB ³⁾
11	Heitkamp	Heitkamp	B	X		Gleisrost im Schottertrög, mit Mörtel vergossen	Aug 95	6/95
12	Holzmann	Holzmann	B	X		Einzelstützpunkte auf Basis der loarg 300	Nov 95	15/95
13	Hochtief / Schreck-Mieves / Longc	Hochtief	B	X		Einzelstützpunkt loarg 300, Stahlfaserbetonsocke	Feb 96	21/95 u. 273/96
14	BES	Heilit+Woerner	B	X		Einzelstützpunkte loarg 300 auf profilierter Tragplatte	Jan 96	34/95 u. 516/01
15	Züblin-Einzelstützpunkte BWG	Züblin	B	X		Einzelstützpunkte der Fa. BWG auf BTS	Mai 96	211/96
16	Züblin-Einzelstützpunkte Hill	Züblin	B	X		Einzelstützpunkte loarg 336/HILT auf BT ⁵⁾	Mai 96	220/96
17	FFC	Leonhard Weiss	B	X		Einzelstützpkt. loarg 300 auf profilierter Tragplatte	Mai 96	219/96
18	Rheda Berlin	Spie Batignolles	B	X		Zweiblockschwelle B355TS im Troc	Jul 96	214/96
19	Rasengleis	Heilit+Woerner / Hiltl	B	X		Langsbalken, Einzelstützpunkt loarg 336/HILT	Sep 96	247/96 u. 506/01
20	Rheda Dyrwidag	Dyckerhoff & Widmann	B	X		Spannbeton Schwelle B301/302 I=2.4m, Troc	Jan 97	289/96
21	Rheda Heilit+Woerner	Heilit+Woerner	B	X		Rheda Sengenberg mit höhen genau hergestellte Betonleiste	Mai 97	204/97
22	Rheda Berlin HGV	Spie Batignolles	B	X		Zweiblock-Filigranschwelle B355TS-M ⁶⁾ , Troc	Mai 97	211/97 u. 261/99
23	Rheda modifiziert Koehne	Koehne	B	X		Spannbeton Schwelle B301/302 I=2.4m, Troc	Jul 97	235/97
24	Porr Platte	Porr Bahnbau (Österr.)	B	X		unterrossene FTP, verankert mit Stützkörper	Nov 97	233/97
25	Rheda Wayss & Freytag	Wayss & Freytag	B	X		Spannbeton Schw. B317 I=2.4m, ohne Troc, FBP	Nov 97	255/97
26	SGV	Strabag	A	X		Schwellen B302 oder B325 bituminös vergossen	Aug 98	270/98
27	Boßl	Boßl	B	X		X unterrossene FTP, Fugen vorgespannt, Bef. loarg 300 u. ECF	Sep 98	31/98; 583/00; 600/00
28	Rethwisch o. T.	Rethwisch	B	X		System Rheda ohne Troc, Schw. B336 mit Hakenbügel, FBP	Okt 98	248/99
29	Sonneville Low Vibration Track (LVT)	Sonneville (USA)	B	X		Schwellenblöcke im Gummischuh, einbetonier	Okt 98	254/98
30	Boßl modifiziert	Boßl	B	X		FTP reduzierte Breite, für 0.6 und 1.0-UIC 71	Okt 99	251/99 u. 556/01
31	Züblin Zweiblockschw. mit Gitterträger (V1)	Züblin	B	X		Schwellen B 361-V1 in frischen FBP-Beton eingerüttelt	Jan 00	265/99 u. 581/01
32	Rheda H+W Zweiblockschw. mit Gittertr.	Heilit+Woerner	B	X		System Rheda Sengenberg mit B 361-V1 ⁹⁾ , 0.8-UIC71	Feb 00	289/99
33	BES IV	Heilit+Woerner	B	X		Einzelst. auf profil. BTS, verdüb. Fugen, 0.8 u. 1.0-UIC71	Apr 00	254/99
34	Rheda 2000	Pfleiderer	B	X		Zweiblock-Filigranschw. B355 M (Gittertr.) ¹⁰⁾ , FBP, ohne Troc	Apr 00	508/00
35	Rheda H+W ohne Troc mit Zweibl.schw.	Heilit+Woerner	B	X		Schw. B361-V1 mit Gittertr. ⁸⁾ , Richtsyst. bbw/H+W, 0.8-UIC71	Mai 00	520/00
36	Rheda H+W mit Troc mit Zweiblockschw.	Heilit+Woerner	B	X		Schw. B361-V1 mit Gittertr. ⁸⁾ , Richtsyst. bbw/H+W, 0.8-UIC71	Jul 00	537/00
37	Rheda München mit Zweiblockschwellen	Walter Heilit	B	X		Schw. B361-V1 mit Gittertr. ⁸⁾ , ohne Troc, 0.8 u. 1.0-UIC71	Apr 01	584/00
38	Rheda Karlsfeld mit Zweiblockschwellen	Walter Heilit	B	X		Schw. B361-V1 mit Gitterträger ⁸⁾ in FBP, 0.8 u. 1.0-UIC71	Apr 01	585/00
39	Rheda Berlin HGV-Spie (troglös)	Spie Enertrans	B	X		Zweiblock-Filigranschw. B355 3TS-M-BS, Troc, 0.8 u. 1.0-UIC71	Jul 01	529/01
40	BES auf ToB	Walter Heilit	B	X		System BES auf ungebundenen Tragschichten	Apr 02	596/01
41	Züblin Zweiblockschw. mit Gitterträger (V2)	Züblin	B	X		wie Nr. 31 mit Schwellen B 361-V2 (verstärkter Gitterträger)	Sep 02	561/02
42	Rasegleis Walter-Heilit II	Walter Heilit	B	X		Langsbalken in Drainbeton integriert u. mit Bew.eisen verb.	Nov 02	557/02
43	Rheda 2000 (mod. Schwelle)	Pfleiderer	B	X		wie Nr. 34 mit Schw. B355.3 mit verlängertem Gitterträger	Mrz 03	521/03

Aufgelagerte Lösungen

1	FFYS Stahlschw. mit Doppelauflage	SATO	A	V		Y-Stahlschwelle mit Bef. A7, auf ATS verschraub	1986	DB
2	SATO - Betonschw. mit Doppelauflage	SATO	A	V		Spannbeton Schw. "Essen" mit Bef. A7, auf ATS verschraub	1989	DB
3	ATD I	Deutsche Asphalt	A	V		Zweiblockschwelle B350, Querkraftsockel	1993	DB ³⁾
4	ATD II	Deutsche Asphalt	A	X		Monoblockschwelle, Querkraftsockel	1993	DB ³⁾ u. 45/95
5	Walter	Walter	A	X		Schw. B311 modifiziert, verankert mit Stahldübe	Jul 94	5/94
6	BTD-V1	Heilit+Woerner	B	X		Schw. B301 verankert mit Spannbügel	Sep 94	10/94
7	BTD-V2	Heilit+Woerner	B	X		Schw. B301 u. B320 verankert mit lösbarem Spannanker	Nov 94	19/94
8	FFYS Stahlschw. mit Doppelauflage	Krupp GfT	A	X		Y-Stahlschwelle mit Bef. A7, Riegel eingegossen	Dez 94	8/94
9	Getrac A1	Wayss & Freytag	A	X		Schw. B316 verankert mit Dübelstein	Dez 94	13/94 u. 237/96
10	FFYS Stahlschw. mit Doppelauflage	Krupp GfT	A	X		Y-Stahlschwelle mit Bef. A8, Riegel eingegossen	Mai 95	22/94
11	Moll / Stewinc	Moll-Stewinc	A	X		Schw. B325 mit Riegel in Fräsnut eingegossen	Okt 95	11/95
12	SATO - Betonschw. mit Doppelauflage	SATO	A	X		Schw. verschraubt oder Riegel eingegossen	Mrz 96	42/95
13	BTD-V2	Heilit+Woerner	B	X		Schw. B301 u. B320 verankert mit Verbund-Klebeanke	Okt 96	254/96
14	SATO - Betonschwellen 30C	SATO	A	X		Schw. mit loarg 300-3, I=2.3m, Riegel eingegossen	Feb 97	201/97
15	Getrac B1	Wayss & Freytag	B	X		Schw. B316 verankert mit Dübelstein	Aug 97	239/97
16	Getrac B2	Wayss & Freytag	B	X		Schw. B317 mit W-Bef. auf elast. Lager, Dübelstein	Sep 97	231/97
17	Strabag	Strabag	A	X		Schw. B325 mit 2 elast. verklebten Stahldübe	Nov 97	251/97
18	Getrac A3	Pfleiderer	A	X		Breitschwelle BBS3 mit loarg300, verankert mit Dübelstein	Nov 97	238/99
19	Strabag	Strabag	B	X		Schw. B325 mit 2 elast. verklebten Stahldübe	Feb 99	283/98
20	SGV	Strabag	A	X		Schw. B325 mit Gußasphalt auf ATS vergossen	Aug 99	270/98
21	BTD II verdübell	Walter Heilit	B	X		System BTD-V2 auf verdübelten Ortbetonplatt	Okt 00	277/99
22	BTD-V2 auf ToB	Walter Heilit	B	X		System BTD-V2 mit BTS auf ungebundenen Tragschichten	Apr 02	596/01

Bilaga 3 Förslag på forskningsprojekt relaterade till höghastighetståg formulerade i [15].

- Repercussions of running a mixture of high speed and conventional trains on the same line.
- Conditions for running trains in a mixed traffic regime in 2 track tunnels (aerodynamics and safety)
- Permissible lengths of tunnels for each solution (one or two galleries)
- **Transition from ground works to civil engineering structures**
- Size of the effective bearing area of sleepers.
- **Assessment of dynamic forces.**
- **Detailed consideration of the optimum value of the vertical stiffness of the track.**
- **Definition of a typical profile for the layer of ballast.**
- **Advantages and disadvantages of ballasted track and unballasted track.**
- **Geometric quality of the track and its relation with the maintenance policy and standards.**
- Revision and extension of the report UIC IF 7/96.
- Preparation of a classification of high speed lines (equivalent to that which exists for conventional lines)
- Revision of the Prud'homme formula.
- A permanent discussion on the subject of the very high speed systems (lines, rolling stock, design, operating conditions)
- In particular, a second part of this report, with more specific questions or more detailed analysis on certain aspects or parameters.

Bilaga 4 Utförlig beskrivning av asfalt som konstruktionsmaterial

Asfalt är ett kompositmaterial som framför allt består av ballastmaterial i olika fraktioner samt bitumen. Genom att förändra kompositionen och relationen mellan dessa beståndsdelar kan ballastmaterials och bitumens goda egenskaper optimeras för att uppfylla olika krav. Ibland kan det vara både tekniskt och ekonomiskt gynnsamt att förbättra asfaltegenskaperna genom modifiering av de ingående beståndsdelarna och/eller inblandning av tillsatsmedel i asfalten, så som fibrer, polymerer, vidhäftningsmedel och överskottsprodukter. Via inblandning av dessa tillsatsmedel kan asfalt principiellt skräddarsys för olika applikationer och för specifika krav såsom jämnhet, ljushet, buller, styvhet, flexibilitet, stabilitet, slitstyrka, utmattning, vattenkänslighet, flytegenskaper och åldringsbeständighet. Tillsatsmedel kan även användas i avsikt att kostnadseffektivisera produkten samt möjliggöra potentiella funktionella egenskaper som till exempel bullerreduktion. Asfalt har som alla andra byggmaterial för- och nackdelar. Men för vägändamål har det visat sig att asfalt har många fördelar med avseende på teknik, miljö och ekonomi, framförallt vid hög trafikvolym och högre hastigheter. I följande avsnitt förmedlas kunskaper om karakteristiska egenskaper hos asfalt och dess ingående material, särskilt med tanke på användning i spårkonstruktioner.

Ballastmaterial

Ballastmaterial är en gemensam benämning på sönderdelat material, främst bergmaterial, för bygg- och anläggningsändamål. Det sönderdelade materialet kan bestå av bergkross, naturgrus, restprodukter eller återvunnet material. De olika materialtyperna kan användas var för sig eller blandade. Vanligen förädlas materialet för att passa en bestämd funktion, t ex som bärlager i en vägöverbyggnad, som makadamballast i en bananöverbyggnad eller som beståndsdelar i en asfaltbeläggning. Vid klassificering av ballastmaterial indelas materialet i olika fraktioner, dvs. kornstorlekar inom vissa gränser; filler, 0-2, 0-4, 4-8 mm osv. En och samma fraktion kan användas för olika ändamål. Till exempel kan fraktion 8-16 fungera som dränerande material eller som beståndsdel i en asfaltbeläggning för vägar. Det bör dock noteras att olika användningsområden kan ha helt skilda krav på en och samma fraktion. Det kan till exempel vara tillräckligt att endast specificera kornstorleksgränser för att uppfylla kravet för ett dränerande lager, medan stenmaterial till asfaltmassor dessutom måste uppfylla ett antal andra krav gällande nötnings- och deformationsresistens, god friktion, vidhäftning osv. Genom användande och komposition av olika fraktioner i lämpliga proportioner kan en god stenmaterialsammansättning (kornstorleksfördelning) tas fram. Kornstorleksfördelningen är enkel att bestämma men samtidigt en fundamental beskrivning av materialet. Den utgör följaktligen också den viktigaste testmetoden. Det är sammansättningen av de ingående materialen i ballasten, dvs. bergkross, naturgrus, restprodukter eller återvunnet råmaterial, som avgör slutproduktens kvalitet. Det kan vara samma råmaterial i alla fraktioner eller så kan materialet i vissa fraktioner utgöras av ett material med t ex förbättrade egenskaper för att kunna uppfylla någon specifik funktionell egenskap. För ballastmaterial till asfaltbeläggningar krävs vanligtvis att de ingående materialen är av god kvalitet.

För att kontrollera och kvantifiera ett ballastmaterials materialegenskaper utfördes tidigare enbart ett antal enkla empiriska tester. Eftersom dessa tester baseras på erfarenheter av hur ett liknande material fungerat i en viss applikation och under specifika betingelser är de av begränsat värde då någon av dessa betingelser förändras, t ex klimat, belastning, dräneringsgrad osv. Under de senare åren har därför utvecklingen gått mot mera fundamentala tester av ballastmaterialens mekaniska egenskaper. Då ballastmaterials egenskaper bland annat är utpräglat spännings- och vattenhaltsberoende krävs således omfattande materialprovning för att beskriva de karakteristiska materialegenskaperna. Enligt ett flertal studier uppvisar ballastmaterial ett komplext elasto-

plastiskt beteende under en transient last. Det är här viktigt att poängtera att deformationerna dels är elastiskt återgående (resilienta), dels kvarstående plastiska (permanenta). De resilienta deformationerna överväger alltid i storlek medan de permanenta deformationerna förorsakar sättningar, särskilt vid höga belastningsnivåer. De resilienta egenskaperna är dock av stort intresse i järnvägssammanhang eftersom de medverkar till den fjädrande förmågan hos spårkonstruktionen. I ett europeiskt projekt, EUROBALT, European Research projekt for Optimised BALasted Tracks, framgår att några av de viktigaste faktorerna med avseende på försämring av spårgeometri kan hänföras till spårelasticitet samt variation av elasticiteten [16]. Vidare beror materialets egenskaper av ett antal faktorer vars samverkan inte är helt klarlagd. Därtill uppvisar ballastmaterial en relativt stor spridning av materialegenskaperna beroende av materialets ursprung och tillverkningsprocess. Under senare år har det därför föreslagits ett antal modeller för att beskriva materialets beteende vid olika typer av belastningar. Liknande resultat har presenterats i EUROBALT [16], där sammanställda ballastmodeller omfattar ett antal parametrar som är svåra att definiera. Vidare konstateras att det idag inte finns någon fullständig kunskap och att det kommer att krävas omfattande forskning för att nå en bättre förståelse om ballastmaterialets mekaniska egenskaper vid en rörlig last, samt möjliggöra implementering i dimensioneringsverktyg.

I Sverige har vi förhållandevis god tillgång till mycket bra stenmaterial. Men eftersom ballastmaterial inte är en förnyelsebar naturresurs är det angeläget att bruka det med förnuft. För en hållbar naturresurshushållning gäller det att inte använda ballastmaterial med bättre egenskaper än vad som erfordras.

Vissa önskade egenskaper hos stenmaterial kan förbättras genom bearbetning och förädling såsom krossning och sortering. Ett annat sätt att förbättra ballastmaterialens egenskaper är att tillsätta ett bindemedel som cement, kalk eller bitumen.

Bituminösa bindemedel

Även om bindemedelshalten i en asfaltbeläggning bara är ca 4-7 viktsprocent påverkar bindemedlet asfaltens egenskaper i stor utsträckning. Bindemedlet ska hålla samman stenmaterialet och bidra till den lastbärande förmågan hos asfalten, men samtidigt ge nödvändig flexibilitet så att inte sprickor uppkommer. Dessa krav ska uppfyllas vid såväl sträng vinterkyla som varma sommarkvar. Dessutom ska bindemedlet vara tillräckligt mjukt vid höga temperaturer så att asfalten kan läggas ut. Det är även viktigt att bindemedlet kan behålla sina goda egenskaper under sin livscykel, att det inte åldras.

Bituminösa bindemedel för asfaltbeläggningar är högförädlad material som i huvudsak kommer från destillation av råolja. Beroende av ålder och betingelser vid råoljans bildande kan den ha mycket varierande sammansättning. Genom successiva destillationer och tekniska processer kan önskad bitumenkvalitet framställas. För beläggningsändamål framställs vanligen ett mjukt och ett hårt bindemedel vilka senare kan blandas för att erhålla mellanliggande kvaliteter. Under senare år har det också blivit vanligare med så kallad bland-bas bitumen vilket har sitt ursprung från destillation av en blandning av olika sorters råoljor eller en blandning av olika bitumen framtagna ur olika råoljor.

Bitumen består av miljontals olika kemiska föreningar. Det är därför inte möjligt att entydigt kemiskt definiera bitumen. Istället analyseras bitumen med ett flertal metoder för att bestämma såväl kemiska som mekaniska egenskaper. Exempel är bestämning av molekylviktsfördelning, löslighet, kemiska bindningar, ”smältpunktsfördelning”, deformationsbeteende vid varierande temperaturer och last, resistens mot åldring eller andra mätbara storheter. Det är även vanligt att

dela upp bitumen i fraktioner med avseende på till exempel löslighet, molekylvikt, reaktionsbenägenhet, smält-/kristallisationspunkt eller polaritet. Genom bestämning av fraktionernas mängd och ytterligare analys av enskilda fraktioners egenskaper kan hypoteser läggas fram om vad som orsakar observerade problem eller varna för framtida problem. Forskningen har ännu inte nått dithän att en entydig koppling kan erhållas mellan enbart kemiska studier och funktion i fält. Provning av bitumen måste även inkludera mekanisk provning. Det är viktigt att i detta sammanhang även poängtera betydelsen av interaktionen mellan bitumen och ballastmaterial.

Många av ovanstående metoder används bara vid framställning av bitumen för att styra tillverkningsprocessen. Specifikationerna är utformade kring enklare och mer definierbara metoder. Bitumen karakteriseras med ett antal olika egenskapstal av vilka de flesta är mått på viskositet, elasticitet och plasticitet, som med ett gemensamt namn kallas reologiska egenskaper. Bitumen beter sig som en viskös vätska vid höga temperaturer och långa belastningstider (t ex tjälrorelser). Vid låga temperaturer och korta belastningstider (t ex trafiklast) är beteendet elastiskt (dvs. deformationerna återgår, de är resilienta). För mellanliggande temperaturer och belastningstider uppvisar materialet visko-elastiska egenskaper. Detta innebär att dess materialegenskaper är starkt beroende av temperatur samt av belastningstid. Detta innebär också att materialet har vibrationsdämpande egenskaper. För en tillfredställande klassificering av bitumen krävs därför att materialet testas vid olika temperaturer och belastningstider. Det är även viktigt att bindemedlen provas med ovanstående metoder efter artificiell åldring så att beständigheten kan värderas. Två principiellt skilda varianter förekommer; åldring vid hög temperatur (simulerar åldring vid tillverkning och läggning av asfalt) och åldring under högt syretryck (simulerar långtidsåldring på vägen). Mekanismerna bakom åldring vid produktion och under beläggnings livstid skiljer sig nämligen åt. Prioritering av egenskaper hos bitumen skall utföras med hänsyn till såväl typ av beläggning, typ av belastning som lastintensitet och klimat. För att säkerställa att rätt kvalitet uppnås måste bituminet uppfylla ett antal krav enligt specifikationen SS-EN 12591 för vilka de mest relevanta kraven för svenska förhållanden finns angivna i ABT VÄG [35]. Bitumen modifieras i stor utsträckning med tillsatser för ytterligare förbättringar av bindemedlets egenskaper. Det kan röra sig om polymerer för att minska risken för deformationer och sprickor eller vidhäftningsmedel för att minimera negativa effekter av vatten på asfaltens egenskaper. I Sverige utgör bindemedel med olika tillsatser en väsentlig del av totala volymer.

Genom lämplig proportionering av bituminösa bindemedel och stenmaterial kan olika beläggningsmaterial framställas.

Proportionering av bitumenbundna beläggningar

Forskning och utveckling kring bitumen och proportionering har som en följd av den ökande trafiken och ett ökat behov av bättre och kostnadseffektiva vägar kraftigt accentuerats under de senaste 30 åren. Denna utveckling har lett till allt bättre och mer specialiserade beläggningsmaterial. Idag är det möjligt att skraddarsy och optimera en beläggning enligt givna last- och klimatförhållanden. För att en beläggning skall erhålla önskvärda egenskaper, t ex god stabilitet, homogen sammansättning mm, krävs förutom noggrann proportionering även att tillverkning, transport och utläggning kan utföras på ett lämpligt sätt. Det är därför viktigt att även beakta de produktionstekniska faktorerna vid proportioneringen. Krav på beläggningar kan ställas på de ingående enskilda materialen, sammansättningen eller som funktionella egenskaper.

I vägbyggnadssammanhang eftersträvas stenmaterialets slitstyrka, resistens mot deformationer och goda friktion. Bitumen har förmågan att binda ihop stenmaterialet och ge styv respons (god lastspridning) vid trafiklast, samtidigt som bitumen ger nödvändig flexibilitet mot långsamma

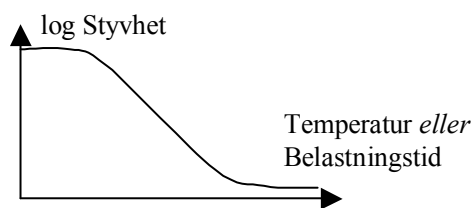
deformationer vid t ex tjällyftning. Till skillnad från t ex betong kan sprucken asfalt även läka ihop under gynnsamma omständigheter.

Tidigare var proportioneringsarbetet baserat på empiriska erfarenheter och samband. Idag används mer och mer proportioneringsmetoder baserade på funktionella egenskaper.

Vid proportionering kan beläggningsens egenskaper påverkas av bland annat följande faktorer: stenmaterial sammansättning, filler, fibrer, stenmaterialkvalitet, bindemedelshalt, typ av bindemedel och tillsatsmedel. Genom lämplig sammansättning kan olika önskvärda egenskaper erhållas. För standardprodukter finns angivet hur dessa beläggningar skall proportioneras och vilka krav de skall uppfylla, se till exempel ATB VÄG. Dessa krav är ofta uttryckta i hålrumshalt, bindemedelshalt och korngredning.

För mera specialiserade beläggningmaterial utförs proportioneringen enligt fastställda rutiner och funktionell provning på de ingående beståndsdelarna samt på den färdiga produkten. Enligt ATB VÄG kan krav på funktionella egenskaper ställas på färdig beläggning, på tunna lager, samt på vägytan. Denna utveckling har lett till förbättrad teknisk kunskap, samt ett antal nya bättre asfaltprodukter med större hänsyn till framtida underhållsåtgärder och kostnader.

Proportionering av beläggningar för järnvägsändamål följer samma metodik som för vägbeläggningar. Det finns dock ett antal faktorer som särskilt måste beaktas. Livslängden för asfalt i banöverbyggnader måste vara betydligt längre än för vägändamål. I Tyskland förordas en livslängd upp mot 60 år. För att klara detta krävs att beläggningsen proportioneras tätare och med en hög bindemedelshalt för att varken oxidation eller vatten skall inverka menligt. Tätare massor med ett lågt hålrum på ca 1-3% klarar åldring bättre vilket leder till en förbättrad livslängd med avseende på utmattning och deformation, En annan skillnad är tillåtna axellaster. För vägar tillåts i Europa axellaster upp mot 13 ton vilket resulterar i ett kontaktryck mellan däck och beläggning på upp mot 900kPa. Största tillåtna axelast för tågfordon är upp mot 30 ton vilket resulterar i ett kontaktryck upp mot 300kPa mellan slipers och beläggning. Således är belastningen från tåg endast en tredjedel jämfört med belastningen på vägar. En annan faktor att beakta är asfaltens temperaturberoende. Uppmjukning av asfalten sommartid vid starkt solsken kan leda till problem då den används som beläggning på väg. Detta borde inte vara något större problem då temperaturerna vid användning i järnvägsöverbyggnader kraftigt reduceras av ovanliggande utrustning (ex sliprar, bullerskydd och ballast mm). Styvhet hos asfalt vid varierande temperatur eller belastningstid beskrivs principiellt i figur 1.



Figur 1 *Principiell variation av styrhet med avseende på temperatur eller belastningstid.*

Vid hög temperatur och/eller lång belastningstid är bitumenet mjukt och asfaltens respons beror mest på dess stenmaterial. Omvänt, vid lägre temperatur och/eller kortare belastningstid beror styrheten mer på bitumenet, men även i detta fall är stenmaterialet viktigt för att förstyya asfalten. Beroende på bitumenets temperatur och belastningstid kan asfaltens respons beskrivas antingen som elastisk, viskoelastisk eller viskös. Vid normala driftstemperaturer är asfaltmaterials egenskaper att betrakta som viskoelastiska. Visko-elasticitet ger, som ovan antytts, asfalt i spårkonstruktioner ett antal fördelar jämfört med ren makadam, men även nackdelar. Förutom den ökade anläggningskostnaden kan deformationerna i asfalt öka, särskilt

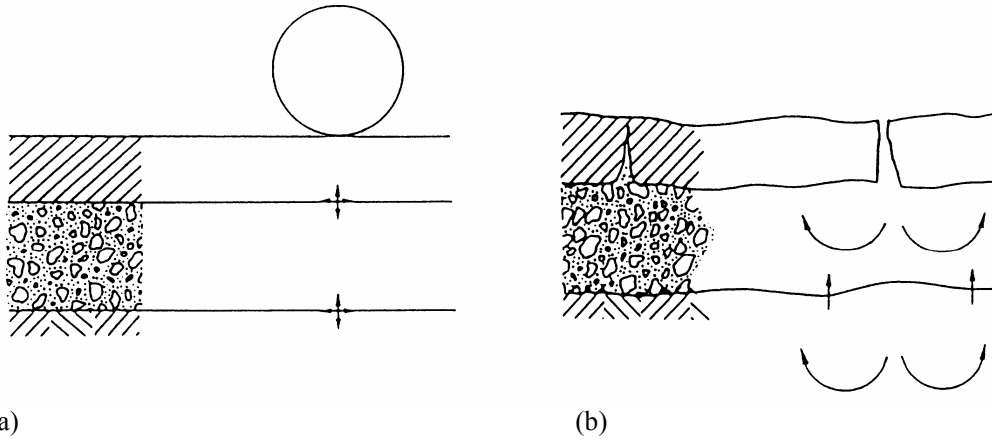
vid låg tåghastighet och hög halt av bitumen. Det är dock inte något problem att producera asfalt med likvärdiga eller bättre egenskaper än makadam i detta avseende. Deformationer från tåg framförda i normala eller låga hastigheter har inte rapporterats utgöra något större problem. De potentiella fördelarna med visko-elastiska material utsatta för snabba belastningar är flera. Genom materialets visko-elastiska natur sker en viss dämpning i materialet. Denna dämpning har visat sig till viss del kunna reducera vibrationer alstrade av tågen [17]. En annan fördel är att asfalt är relativt enkelt och snabbt att lägga ut vilket innebär att det kan börja belastas så fort temperaturen har sjunkit till 30-40°C.

Genom asfaltlagrets goda lastspridande förmåga i kombination med asfaltlagrets vattentäta egenskaper kommer underliggande ballastmaterial att utsättas för betydligt lägre spänningsnivåer och uppvisa bättre och jämnare material egenskaper jämfört med ballastspår. En annan skillnad är kraven på utförande. För asfalt för järnvägsändamål ställs betydligt högre krav på jämnhet än för vägbeläggningar. I Tyskland nämns jämnhetskrav på $\pm 2\text{mm}$ (på en sträcka av 4m). Detta är dock inget problem då dessa krav kan uppnås med moderna maskinstyrningssystem [18]. Vidare ställs höga krav på bankroppens styvhet och dess variation. Homogena egenskaper kan säkerställas genom höga krav på tillverkning, transport och framförallt utläggning och packning. Förbättrad produktionsutförande medför också en högre och jämnare kvalitet. Genom nya och bättre maskinstyrningsutrustningar kan man få en yttäckande kvalitetskontroll för det färdiga asfaltlagret.

Analytisk dimensionering av överbyggnader

Inom vägbyggnad har utvecklingen under de senaste 40 åren gått från empiriska till analytiska dimensioneringsmetoder, vilka baseras på fundamentala teorier kring materialens beteende under last och klimatpåverkan. Eftersom teorierna är generella och oberoende av yttre förutsättningar är de möjliga att applicera på problem där helt andra lastfall dominerar. Det finns därför en stor potential för utnyttjande av erfarenheterna från vägdimensionering vid utveckling av dimensioneringsmetoder för banöverbyggnader. Dimensioneringsmetoderna utvecklade för vägdimensionering är mer utvecklade än de för bandimensionering, vilket motiverar att avsnittet utgår från vägbyggnad.

En analytisk dimensioneringsansats tillämpar allmän ingenjörsvetenskap och använder konstitutiv analys för att beräkna överbyggnadens respons, dvs. spänningar, töjningar och deflektioner, för specifika yttre förutsättningar (figur 2a). Responsen är en funktion av belastning, typ av struktur samt ingående materials mekaniska egenskaper. En optimalt dimensionerad överbyggnad fordrar att de yttre förutsättningar som överbyggnaden kommer att vara verksam under kan definieras på ett korrekt sätt, samt att den analytiska modellen kan beskriva dess inverkan på överbyggnadens nedbrytningsförlopp. Nedbrytningsförloppet beskrivs vanligen genom empiriska relationer mellan observerat beteende hos ”verkliga” överbyggnader och beteende uppmätt hos provkroppar i laboratorium (figur 2b). Den mätta responsen måste via någon lämplig korrelationsfaktor anpassas till verklig nedbrytning i överbyggnaden.

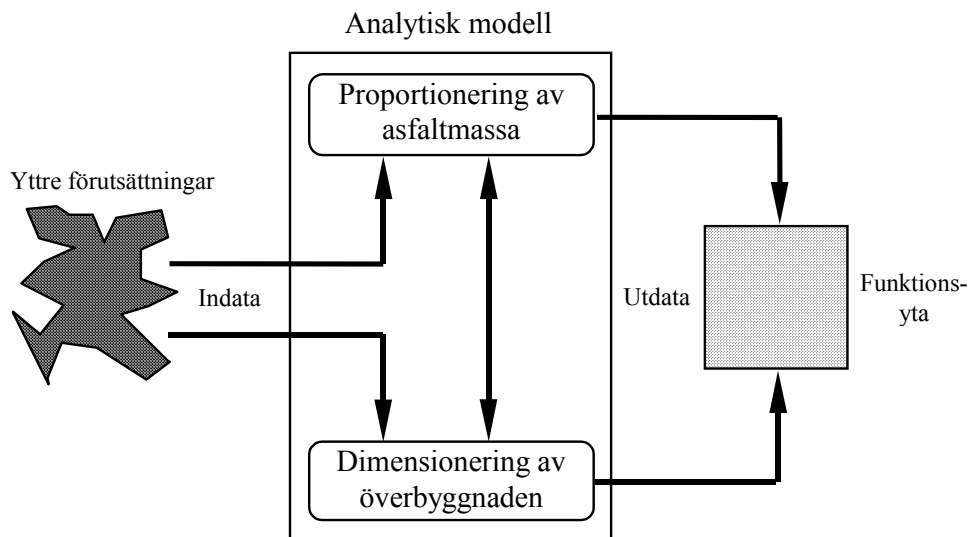


Figur 2 Beräkning av respons relaterat till nedbrytning i överbyggnaden.

Vanligtvis indelas överbyggnadens tillstånd i både funktionellt och strukturellt tillstånd. Det funktionella tillståndet beskrivs av komfort, säkerhet, buller, rullmotstånd etc., medan bärlighet beskriver strukturellt tillstånd.

En fiktiv analytisk dimensioneringsmetod beskriven i detta kapitel kan för givna förutsättningar ge svar på överbyggnadens nuvarande tillstånd och prognostisera framtida tillstånd. Även konsekvenser av förändringar av de yttre förutsättningarna skulle vara möjlig att ta hänsyn till.

Principiellt kan en analytisk dimensioneringsprocess beskrivas enligt figur 3.

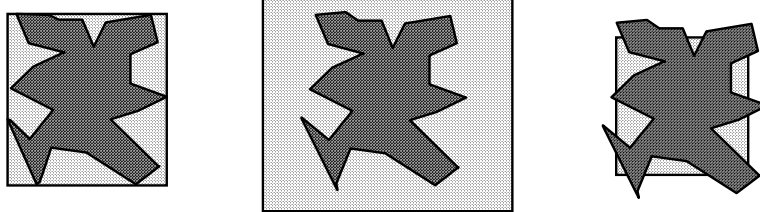


Figur 3 Principiell modell av dimensionering processen.

De yttre förutsättningarna omfattar alla aspekter som överbyggnaden kommer att utsättas för under definierad tidsperiod. Dessa yttre förutsättningar kan begreppsmässigt beskrivas som en yta som är irreguljär i sin form beroende av regionala förhållanden etc. (figur 3). Eftersom man inte fullständigt kan definiera alla de faktorer som kommer att påverka överbyggnadens nedbrytning, såsom klimat, trafik, tillgängligt material, samt deras variation etc., måste man förlita sig på de

faktorer som kan definieras. De faktorer som kan definieras, analyseras i en analytisk modell och benämns vanligen indata till densamma (figur 3). Den analytiska modellen kan principiellt indelas i två delar; proportionering av asfaltmassa och dimensionering av överbyggnaden (figur 3). Där proportioneringen av asfaltmassa resulterar i en funktionell beläggning för aktuell indata och dimensionering av överbyggnaden resulterar i ett system av lager innehållande lämpliga material, det finns givetvis en inbördes koppling dem emellan (figur 3). Utdata ur en analytisk modell består av erforderlig lagertjocklek och materialegenskaper för respektive lager. Utdata kan begreppsmässigt beskrivas som en funktionsyta inom vilken överbyggnaden kommer att erhålla önskad funktion (förutsatt korrekt dimensionering och produktion), se figur 3. Eftersom överbyggnaden bryts ned som en funktion av tid (även oberoende av belastning), är det viktigt att definiera tidsperioden under vilken funktionsytan skall uppvisa önskad funktion, vanligen benämnd dimensionerad livslängd eller teknisk livslängd.

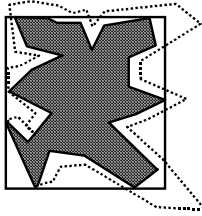
Funktionsytan är en approximativ modell av de yttre förutsättningar vägen kommer att verka inom. Denna yta kan begreppsmässigt beskrivas med en yta till formen reguljär, vilken är definierad med tillgänglig indata av en analytisk modell. En överbyggnad är optimalt dimensionerad om funktionsytan omsluter ytan av de yttre förutsättningarna för ett minimum av kostnader (figur 4a). I övriga fall är överbyggnaden överdimensionerad respektive underdimensionerad (figur 4b & c). Då funktionsytan är mycket större än ytan för de yttre förutsättningarna, är överbyggnaden överdimensionerad och inte kostnadseffektiv. I de fall funktionsytan inte omsluter ytan av de yttre förutsättningarna kommer nedbrytning i konstruktionen uppstå tidigare, vilka medför omfattade underhållskostnader (direkta i form av reparationer och indirekta i form av nedsatt framkomlighet), d.v.s. överbyggnaden är underdimensionerad. Skador i överbyggnaden kommer att uppstå i de delar som inte omsluts av funktionsytan. Typen av skada beror på vilken del av de yttre förutsättningarna som inte omsluts. Vanliga skador som uppstår i överbyggnaden är t ex sprickbildning och spårbildning.



a: Optimalt dimensionerad b: Överdimensionerad c: Underdimensionerad

Figur 4 **Modell av väl-, över- resp underdimensionerad konstruktion.**

Eftersom den analytiska modellens indata inte är konstant under den dimensionerande livslängden kommer ytan som de yttre förutsättningarna beskriver också att variera. Om denna yta utvidgas, t ex om antagen trafikutveckling ökar mer än förväntat, kommer funktionsytan inte att omsluta den nya ytan. Figur 5 visar effekten av förändrade yttre förutsättningar under dimensionerad livslängd.



Figur 5 Effekt av förändrade yttre förutsättningar.

De delar som inte omsluts kommer att öka nedbrytningshastigheten vilket leder till kortare livslängd eller alternativt ökade underhållskostnader.

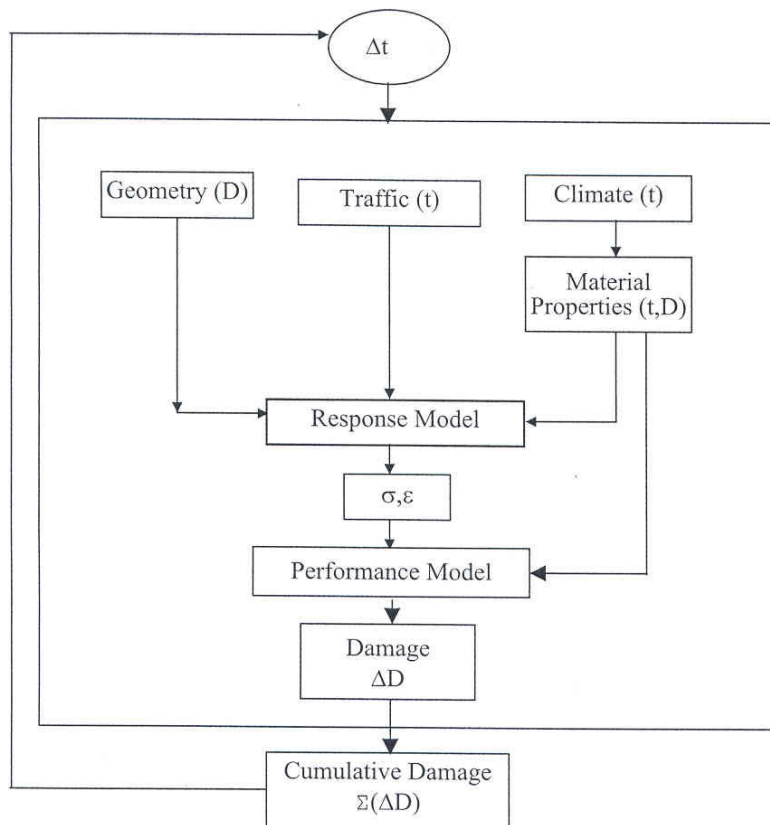
En analytisk dimensioneringsansats ger möjlighet att för varierande olika yttre förutsättningar tillsammans med en analytisk modell, definiera den funktionsyta inom vilken överbyggnaden skall vara verksam. Tillförlitligheten hos en analytisk dimensioneringsansats beror till stor del av hur detaljerat de yttre förutsättningarna kan beskrivas samt hur detaljerat den analytiska modellen kan beskriva funktionsytan. Karakterisering av funktionsytan kräver kunskap om de ingående materialens mekaniska egenskaper samt deras variation. Vidare krävs kunskap om den totala belastningen som överbyggnaden kommer att utsättas för. Även val av konstitutiva samband för den analytiska modellen är avgörande för att beskriva funktionsytan på ett riktigt sätt. Överbyggnadens verkliga respons kan mätas i verkliga vägar för verkliga trafikklaster eller simuleras i laboratorieförsök. Det är också viktigt att definiera under hur lång tid funktionsytan skall bibehålla avsedd funktion, dvs. definiera dimensionerande livslängd.

Karakterisering av nedbrytningsmekanismer, vilka beror av de yttre förutsättningarna, är väsentligt eftersom vi troligtvis aldrig kommer att analytiskt beskriva funktionsytan i relation till de yttre förutsättningarna fullt ut. Därför utförs försök att relatera verklig observerad nedbrytning med uppmätt nedbrytning hos provkroppar. Skillnaden mellan verklig nedbrytning och mätt nedbrytning beskrivs av korrelationsfaktorer. Korrelationsfaktorerna används för att för givna yttre förutsättningar eliminera och beskriva de områden, uppkomna skador i konstruktionen, som inte omsluts av funktionsytan. Begränsningar hos vald modell kan utformas som olika nedbrytningskriterier (utmattning, permanent deformation, lågtemperatursprickor osv.).

Fördelarna med en analytisk dimensioneringsansats är framförallt dess flexibilitet. En analytisk dimensioneringsmodell med väldefinierade indata parametrar ger möjlighet att bedöma tillgängligt material på effektivt sätt. Även införandet av nya material och nya lagerkombinationer blir möjligt med en analytisk dimensioneringsmodell. Detta kan medföra bättre utnyttjande av lokala material och befintligt material i väglinjen. En annan fördel är att en analytisk dimensioneringsmodell enkelt kan ta hänsyn till förändringar av de yttre förutsättningarna utan att en ny modell måste utvecklas.

Hittills har vägingenjörer varit begränsade till att analysera vägöverbyggnader med hjälp av elastisk teori och stationära laster. Tyvärr uppvisar inte vägbyggnadsmaterial egenskaper som överensstämmer med denna teori. Vägbyggnadsmaterial uppvisar i allmänhet icke-linjärt visko-elastisk-plastiskt beteende. Dessutom uppvisar ett antal material starkt spänningsberoende egenskaper. För övrigt är inte trafikklaster stationära utan rörliga med varierande hastigheter. I och med tillgängligheten av kraftfulla datorer har det blivit möjligt att analysera överbyggnadskonstruktioner med förfinade materialmodeller. Ett antal beräkningsprogram, t ex VEROAD och olika FEM-applikationer har utvecklats som möjliggör analys av vägkonstruktioner bestående av realistiska materialegenskaper belastade med rörliga hjullaster.

Gemensamt för dessa analytiska ansatser är att de baseras på konstitutiv analys för att beräkna kritiska påkänningar i överbyggnaden. För en korrekt analys krävs att materialens mekaniska egenskaper och lasten kan definieras. I en analytisk dimensioneringsmodell analyseras påkänningar genom lämplig modellering av påverkande faktorer. Dessa faktorer är i allmänhet relaterade till trafiklasten, klimatförhållanden samt mekaniska egenskaper hos ingående material. Kritiska påkänningar i vägkonstruktionen, orsakade av hjullaster från fordonstrafiken, beräknas och jämförs med tillåtna påkänningar för undergrunden och för de material man valt att använda i överbyggnaden. Tillåtna påkänningar erhålls ur laborietester vilka relateras till observerad nedbrytning. Relation mellan tillåtna påkänningar och nedbrytning benämns nedbrytningskriterier. De vanligaste baseras på vertikal töjning på terrassytan och horisontal töjning vid beläggningens underyta. Överbyggnadens tjocklek relateras till tillåtna töjningar enligt valda nedbrytningskriterier. Under de senare åren har utveckling gått mot kriterier som tar hänsyn till nedbrytningshastigheten genom en iterativ process. Tanken med dessa kriterier är att kunna beräkna nedbrytningsstillskottet för varje enskild belastning. För korrekt dimensionering av överbyggnader krävs att man kan jämföra beräknade töjningar med verkliga töjningar, enbart teori ger inte tillfredsställande resultat. Beräknade töjningar relateras till observerad nedbrytning från laboratorie- eller fältförsök (fullskaleförsök). Fördelen med analytiska metoder är att de är flexibla och kan anpassas till förändrade förhållanden (trafiklast, hastighet, material etc.). Metoden ger tillförlitliga resultat samt har förmåga att förutsäga nedbrytningen i överbyggnaden. Figur 6 visar en fundamental dimensioneringsstruktur.



Figur 6 Schematisk bild av en fundamental dimensioneringsmetodik.

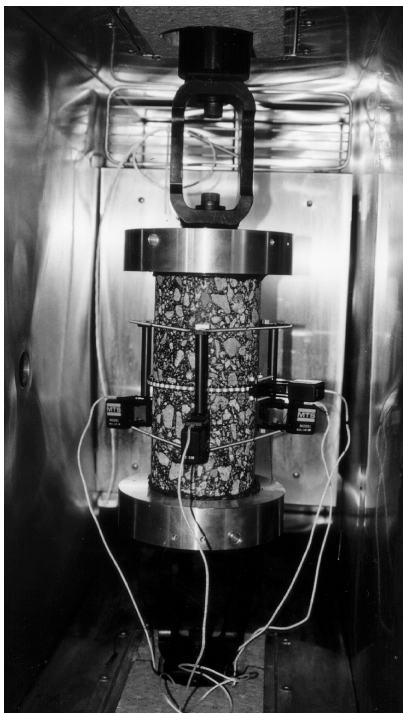
En analytisk dimensioneringsmetod kräver att belastningen samt material kan definieras på ett riktigt sätt. Forskning inom detta område pågår i ett flertal länder.

Även om ovanstående dimensioneringsmetodik är framtagen för vägöverbyggnader så finns ett flertal beröringspunkter och likheter som med fördel kan appliceras på banöverbyggnader. De dimensioneringsmetoder tagits fram för banöverbyggnader är faktiskt baserade på metodiken för vägöverbyggnader (ex. KENTRACK, USA). För närvarande bygger dock dimensioneringsmetoder av banöverbyggnader på empirisk grund och i vissa fall elastisk teori. Som tidigare nämnts är den största nackdelen med empirisk dimensionering att den bara kan användas för ett givet klimat, lastförhållanden och materialtyp. Om dessa förhållanden ändras kommer designen inte längre att gälla och en ny designmetod måste utvecklas för de förändrade förhållandena. Vidare kan till exempel inte en elastisk teori realistiskt beskriva överbyggnadens respons vid olika hastigheter.

Sammanfattningsvis tycks det finnas en stor potential för utveckling av bättre dimensioneringsmetoder för banöverbyggnader genom att dra nytta av utvecklingen och kunskapen inom det vägtekniska området.

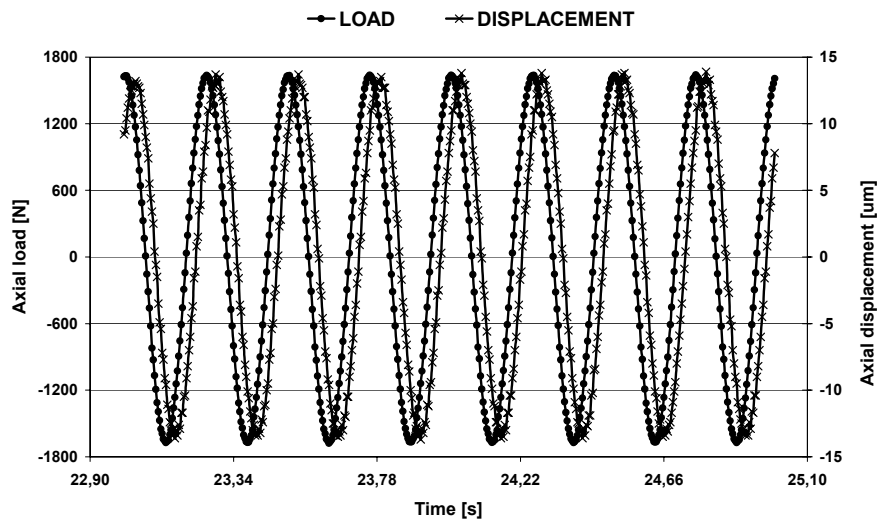
Karakterisering av viskoelastiska materialparametrar för asfaltmaterial

Användbara materialparametrar kan erhållas från någon testutrustning där materialet kan testas vid olika temperaturer och belastningstider (frekvenser). I figur 7 visas en utrustning vid avdelningen för Vägteknik vid KTH. Denna utrustning kan anbringa en pulserande last i både drag och tryck på en provkropp. Vid denna test uppmäts spänningen, axiell och radiell töjningar. Materialet testas normalt för temperaturer mellan -30°C och 60°C och för frekvenser mellan 0.01–40 Hz.



Figur 7 Enaxiell testutrustning med instrumenterad provkropp.

Om en sinusformad last med viss frekvens anbringas ett linjärt viskoelastiskt material erhålls en sinusformad respons som är förskjuten med en fasvinkel, θ . Resultat från sådan mätning visas i Figur 8.



Figur 8 Anbringad last och erhållen respons.

Det framgår tydligt att även responsen är sinusformad och fasförskjuten i förhållande till anbringad last. Komplexmodulen är ett mått på materialets styvhet och kan erhållas genom följande relation:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

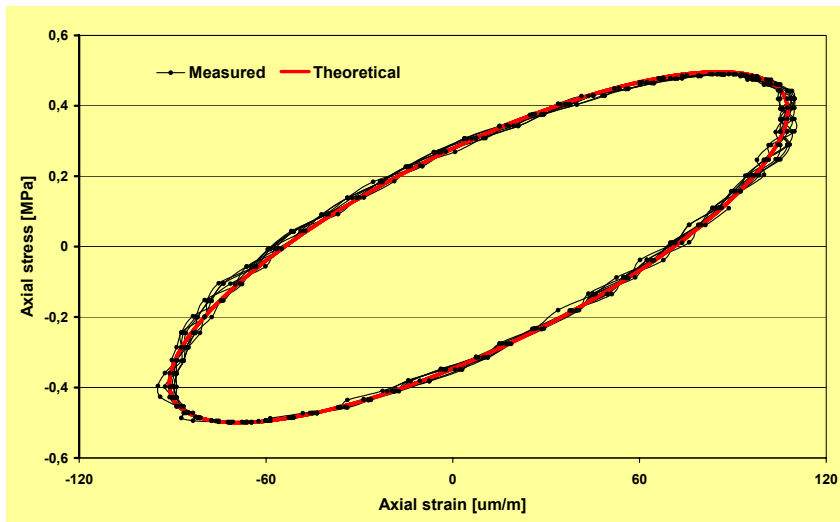
där:

$$\sigma_0 = \text{spänningsamplitud}$$

$$\varepsilon_0 = \text{töjningsamplitud}$$

Orsaken till benämningen komplexmodul är det faktum att responsen hos materialet ofta beskrivs med komplexa tal där den reella delen anger den elastiska andelen i responsen och den imaginära delen den viskösa andelen. Andelarna elastisk och viskös respons anges av fasvinkeln. Fasvinkeln ges av förskjutningen mellan anbringad last och resulterande respons. Absolutbeloppet av den elastiska och viskösa responsen är komplexmodulen enligt ekvation 1.

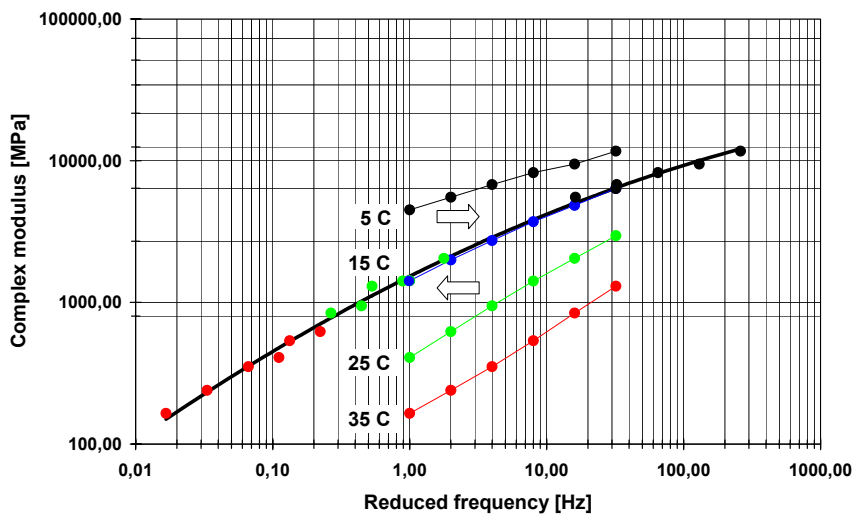
Genom att plotta spänningen mot töjningen fås en hysteresis-loop enligt Figur 9.



Figur 9 *Hysteresis-loop.*

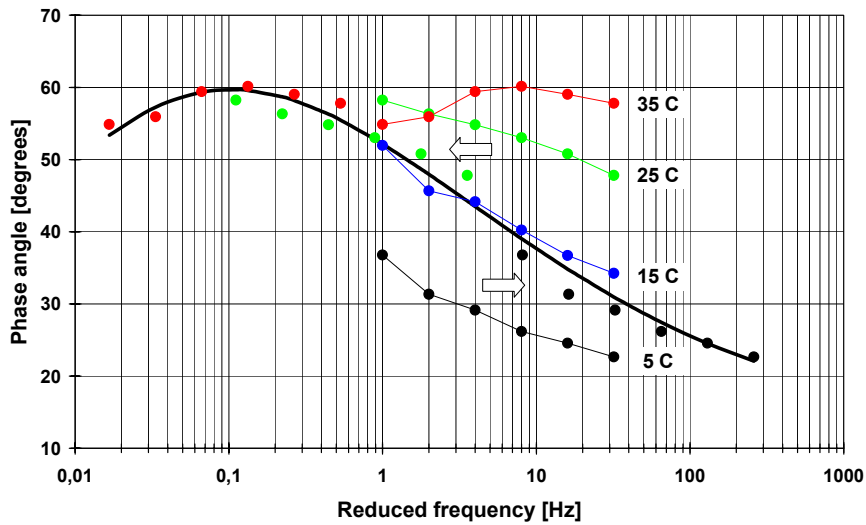
Den inneslutande arean är ett mått på materialets dissiperande energi eller dämpning. I figuren indikeras också den goda överensstämmelsen mellan teori och uppmätta värden.

Nedan visas uppmätta komplexmoduler (figur 10) och fasviklar (Figur 11) uppmätta för fyra olika temperaturer och sex olika frekvenser.



Figur 10 *Uppmätta komplexmoduler för olika temperaturer och frekvenser.*

I figur 10 kan asfaltmaterialets påtagliga temperatur- och frekvensberoende (belastningstid) observeras. Om de uppmätta punkterna förskjuts horisontellt kan de bilda en sk. masterkurva, för en given referenstemperatur. I ovanstående figur visas en masterkurva med referenstemperatur 10°C. Det är tydligt att komplexmodulen ökar för högre frekvenser och med lägre temperaturer. Skillnaden mellan komplexmodulen vid låg resp. hög frekvens/temperatur är mycket påtaglig. Det är därför viktigt att beakta temperatur och frekvensberoendet hos viskoelastiska material.



Figur 11 Uppmätta fasvinklar för olika temperaturer och frekvenser.

Ett idealiserat visköst material har en fasvinkel på 90° , motsvarande elastiskt material har en fasvinkel på 0° . Ett viskoelastiskt material har en fasvinkel mellan 0 och 90° . Figur 11 visar att fasvinkeln generellt ökar för låga frekvenser och högre temperaturer. Reduktionen av fasvinkeln som kan urskiljas vid ca 0.1 Hz beror på att stenskelettet i asfalten tar en allt större del av lasten. Bulkmodulen kan bestämmas från ett triaxial test. Eftersom inga direkta mätningar finns tillgängliga har en uppskattning av dess värde utförts ($K = 6000$ MPa), vilket ungefärligen motsvarar ett värde på Poissons tal mellan 0.3 och 0.45 inom frekvensområdet 0.5 - 40 Hz. Vald materialmodellens parametrar erhålls genom en icke linjär regression av mätpunkterna av komplexmodulen och fasvinkeln för olika frekvenser.

Med hjälp av förfinade analysverktyg tillförs ny kunskap om hur vägöverbyggnader fungerar och bryts ner under trafikbelastning. Med bättre materialmodeller kan dissiperad (dämpad) energi beräknas liksom den permanenta "viskösa" deformationen. Dissiperad energi eller dämpning är ett mått på hur stor mängd energi som går förlorad under en belastningscykel. Dämpning kan vara en positiv egenskap vid användning av asfalt i banöverbyggnader för att minska vibrationer. Denna energi verkar även vara relaterad till utmattning i materialet, dvs. tillväxt av sprickor. Detta kan medföra att nya nedbrytningskriterier kan utvecklas, vilket kan medverka till att flexibla överbyggnader kan dimensioneras och förstärkas på ett mera optimalt sätt. Pågående forskning med mer realistiska materialmodeller har kunnat visa att dessa har förmågan att beskriva och förklara hur en väg nedbryts på ett mycket bättre sätt än traditionella metoder [19, 20].

Bilaga 5 Bibliografi

Ando K, Miura S, Watanabe K	Twent years experience on slab track	QR of RTRI, Vol. 35, No. 1. Feb.	1994
Baxter M I	Dynamics hold the key to whole life costs	Railway Gazette Int'l May	1993
Beecken G	Y-schwellen mit asphalttragschichten für den eisenbahnoberbau	Bitumen 2/85	1985
Beecken G	Asphaltic base course for railway track construction	Shell bitumen review 61	1986
Bono G	Resilient slab track aimed at high speed lines	Railway Gazette international, April	1988
Bullen F, Mangan D A, Bethune J,	Review of the international use of asphalt for railway track support systems,	Proc. 19th ARRB Conference, Australia	1998
Buonanno A, Mele R,	The use of bituminous mix sub-ballast in the Italian state railways,	2nd Euroasphalt & Eurobitume congress	2000
Constable M H T	Asphalt Layers in railway roadbed construction	Shell International Petroleum Company Ltd.	1969
Darr E, Fiebig W	Stand der entwicklung und des einbaus der festen fahrbahn auf asphalttragschichten	Asphalt 7-8/97	1997
Darr E, Fiebig W	Current stage of development and construction of a firm railway bed on an asphalt base	?	?
Eisenmann J, Leykauf G	Feste fahrbahn für schienenbahnen	Betonkalender	2000
Eisenmann J	Ballastless track as an alternative to ballasted track	Rail international, November	1995
Fendrich L,	Schotterlose fahrbahn	Der Eisenbahningenieur 45, 5	1994
Fendrich L,	DB explore the limit of ballastless track,	Railway Gazette Int'l January, 4 p.	1995
Focacci C	Ballastless track - the Italian experience	Rail international, February	1990
Giannattasio P, Caliendo C, Crispino M, Marulo F, Perneti M	Sub-Ballast Role in Dynamic Train-Track-Superstructure Interaction in High Speed Lines	World Congress on Railway Research, Paris. november	1994
Gustafsson P	Forskningsverksamheten inom bl.a. spårstabilitetsområdet. Information om nuläget. Banöverbyggnadens investerings- och underhållskostnader,	SJ Centralförvaltning, Banforskningskontoret, Intern rapport 66-8	1966
Hedström R,	Spårkonstruktion med asfalt – en litteraturstudie,	VTI-notat J17	1993
Hedström R,	Samband mellan trafikbelastning – banstandard – underhållskostnader – en litteraturstudie,	VTI-meddelande 772	1996
Hedström R,	Spårunderhåll – aspekter, synsätt och referensramar – en förstudie,	VTI-meddelande 806	1996
Hedström R,	Återvinning av banvallsmassor och betongsliprar - en förstudie	KFB & VTI forskning Nr.22	1998
Hedström R,	Användning av erfarenheter från vägbyggnadsforskningen inom järnvägsbyggnad,	VTI Meddelande 935	2002
Hermelin K,	Feste fahrbahn-konstruktionen - Perspektiven für strecken mit hohen geschwindigkeiten oder hohen achslasten	VTI:s företagsseminarier vid Nordic rail 99. Red. Lange T.	1999
Hilliges D	Mitigation of track and ground vibrations by high speed trains at Ledsgård, Sweden	?	?
Holm G, Andréasson B, Bengtsson P-E, Bodare A, Eriksson H		Svensk djupstabilisering - report 10	2002
Huang Y, Lin C, Deng X, Rose J	Kentrack: A computer program for hot-mix asphalt and conventional ballast railway trackbeds	Asphalt institute	1984
Huang Y, Rose J G, Khoury C J	Hot-mix asphalt railroad trackbeds	TRR 1095	?
Judge T,	Firming up soft subgrades,	Railway Track and structures, April	2001
Kinross-Wright C E, Santucci L E,	The versatility of asphalt in highways, airfield, and other engineered structures,	3rd conference on road & airfield pavement technology	1998
Lechner B, Leykauf G,	Feste fahrbahn mit asphalttragsschicht – untersuchung...	Asphalt Heft 1/2002.	2002
Lechner B	Asphalt pavements for ballastless track and road construction	Technische Universität München	-
Leykauf G, Lechner B,	Design of Ballastless Track Structures using sleeper panels fixed on concrete or asphalt pavements,	Technische Universität München	-
Leykauf G, Mattner L,	Ballastless track structures in Germany	European railway review, September	1995
Leykauf G, Mattner L,	Feste fahrbahn mit asphalttragsschicht	Der Eisenbahningenieur, 49, 8/98	1998
Li D,	Application and performance of hot-mix-asphalt trackbed over soft subgrade,	Railway Track and structures, January	2002
Matoba K,	Surfaces hold up well under heavy traffic,	Railway Track and structures, June	2001
Mattner L, Freystein H	Zulassung von bauarten im oberbau durch das eisenbahn-bundesamt	Der Eisenbahningenieur, 53, 8/02	2002

NN	Asfalt i järnvägsbyggandet - Use of asphalt in railway trackbeds	BAU projektet, december	1991
NN	Eurobalt - Synthesis Report		1992
NN	Rail transit construction using hot-mix asphalt, Seminararbeit aus Hochleistungsbahnen, die Feste Fahrbahn	Asphalt institute http://www.eiba.tuwien.ac.at/institute/Diplom/hl_sem/feste-fahrbahn/feste-fahrbahn.html	1995
NN	Design of new lines for speeds of 300-350 km/h - State-of-the-art - First report		1999
NN	Spårkonstruktioner vid spårvägstrafikföretag I, Del 1 och 2	International union of railways, High speed dept.	2001
NN	Die forschungsprojekte zur entwicklung der festen fahrbahn	SL Infrateknik AB, Banavdelningen	2001
Oberweiler G, Osswald R	Asphalt in railway applications	Eisenbahntechnische Rundschau, 11	1992
Ravaoli S	Festere Fahrbahn auf Schotter,	SITEB	-
Riessberger K,	Turnout rehabilitation with bituminous concrete underlayment,	Eisenbahntechnische Rundschau, 4	2002
Rose J G,	HMA solves railroad crossing woes,	TRR 1341. 1992. pp75-82	1992
Rose J G,	HMA performs well on road crossings,	Better Roads	1998
Rose J G,	Rail reaps benefits from asphalt trackbeds,	Better Roads	1998
Rose J G,	Asphalt trackbed technology development, the first 20 years	Int'l railway journal, Sept	1998
Rose J G, Brown E R, Osborne M L,		TRR 1713	2000
Rose J G, Hensley M J,	Performance of hot-mix asphalt railway trackbeds,	TRR 1300	1991
Rose J G, Huang Y H	Hot-Mix Asphalt Railroad Trackbed Systems	Proceedings of the ASME/IEEE Joint Railroad Conference, Chicago, April	1990
Sjöholm H,	Asfalt i järnvägskonstruktioner,	Shell asfaltstipendium	1998
Smith R D,	Asphalt trackbeds ideal for big city transit rail, Summary report for project METARAIL –	Asphalt. 1991/01. 4(3) pp4-5 (1 Phot.)	1991
Wirnsberger M, Dittrich M, et al.,	Methodologies and actions for rail noise and vibration control,	European commission Contract RA-97-SC.1080, September	2000