

TUFF-PO

Kravsättning av tidplaner utifrån personalplaneringsbehov

Martin Aronsson, Jan Ekman

Februari 2002

SWEDISH INSTITUTE OF COMPUTER SCIENCE (SICS)
Kontaktperson: Martin Aronsson <martin@sics.se>

Sammanfattning

TUFF-PO rör personalplaneringsarbetet, specifikt planering för bemanning av tåg med lokförare, i tidiga faser då tidtabellen ännu inte är fastställd men då ett antal villkor och begränsningar på tågen och deras rörelser är kända. TUFF-PO genererar förslag och data som möjliggör effektiv personalplanering i senare skeden, genom att skapa begränsningar på tidtabelläggningsen, begränsningar som tar bort dåliga och ineffektiva lösningar ur personalplaneringsperspektivet och bevarar de "goda" och effektiva lösningarna. Fokus för detta arbete är på tid och krav på tid, inte direkt på kostnader. Ansatsen i TUFF-PO är inte att försöka konstruera personalomlopp och inte heller personalslingor utan att titta på arbetsperioder för att utifrån dessa försöka finna gemensamma egenskaper som tycks gynna bra personalomlopp i senare planeringsskeden. Dessa egenskaper lägger grunden för de begränsningar som bildar krav på tidtabelläggningsen. Preliminära resultat pekar på att det är möjligt att skapa kvalitativt bättre personalplaner. Vi tar upp och belyser både generella frågeställningar och den prototypimplementering som är gjord för att validera resultaten.

Nyckelord: Personalplanering, resursutnyttjande, schemaläggning, tidsfönster, taktisk planering

Arbetet som presenteras i denna rapport är finansierat av NUTEK och Vinnova, under programmet Komplexa System under åren 1999-2001, samt SJ och Green Cargo AB.

SICS Technical Report T2002:25
ISSN: 1100-3154
ISRN: SICS-T-2002/25-SE

TUFF-PO

*Kravsättning av tidplaner utifrån
personalplaneringsbehov*

Martin Aronsson, Jan Ekman

SICS
Box 1263
S-164 29 KISTA

dsps@sics.se

I samarbete med Green Cargo/PROFS

15 februari 2002

Innehåll

1 Inledning	6
1.1 Tidtabell och turförteckning	7
1.2 Ansats i TUFF-projektet	7
1.3 Typ av schemalägningsproblem	8
2 En översiktlig beskrivning av TUFF-PO	9
2.1 Avsikten med TUFF-PO	9
2.2 Indata till TUFF-PO	9
2.3 Integrering av TUFF-PO i tågplanearbetet	10
2.4 Delarna i TUFF-PO	11
2.4.1 Bytesplatsanalys	12
2.4.2 Benkonstruktion	12
2.4.3 Arbetsperiodanalys	12
2.5 Analyser som ej omfattas av TUFF-PO	13
3 Arbetstidsregler	13
3.1 Schemalagda aktiviteter	14
3.1.1 Tågtjänst	15
3.1.2 Växling	15
3.1.3 Passresa	15
3.1.4 Byte	15
3.1.5 Kringarbete	16
3.1.6 Uppehåll	17
3.2 Förslag på tider hos konstanter	18
3.3 Arbetstidsregler	18
3.3.1 Definitioner	18
3.3.2 Arbetstidsregler	19
4 Arbetsperiodanalys	19
4.1 Tidtabell och tidtabellspecifikation	19
4.2 Idéer om vilken mängd av arbetsperioder som skall genereras	19
4.3 Huvudidéer om hur genereringen går till	20
4.4 Generera det bästa först	20

4.5	Generering utgående från rastvändningar	21
4.6	Villkor	21
4.7	Konsistens och Koherens	21
4.8	Värderingar	22
4.9	Sökta karaktärer hos tidtabellspecifikationen	23
4.9.1	Nödvändiga arbetsperioder.	23
4.9.2	Nödvändiga delar av arbetsperioder.	23
4.9.3	Begränsning av domäner	23
4.10	Exempel på karaktärer som inte bör beaktas	24
5	Prototypimplementationen	24
5.1	Identifiering av bytesplatser	25
5.2	Bensyntes	26
5.3	Jobbgenerering	27
5.4	Generering av arbetsperioder	28
5.5	Tidtabellkrav, specifikationskrav och OPO-råd	29
5.5.1	Begränsning av tidsdomäner för slottar	31
5.5.2	Dåliga och bra ben och jobb	32
5.6	Resultat	34

1 Inledning

TUFF-projektet rör *tågplanearbetet* som består av att konstruera tidtabell, lokomlopp och turförteckning från vissa givna indata om trafikflödet. Den stora svårigheten i tågplanearbetet är att optimera resurserna, vilket här väsentligen betyder att optimera kostnader för personal, fordon och spårutnyttjande. Optimeringen av resurser ställer krav på hur tågplanearbetet utförs. Ett bra resultat erhålles exempelvis inte om tidtabellen konstrueras utan att ta hänsyn till vilka resurser som i form av lok och personal som tidtabellen kräver.

TUFF-PO rör personalplaneringsarbetet, specifikt planering för bemanning av tåg med lokförare, i tidiga faser då tidtabellen ännu inte är fastställd men då ett antal villkor och begränsningar på tågen och deras rörelser är kända. Tanken med verktyget TUFF-PO är att generera förslag och data som möjliggör effektiv personalplanering i senare skeden, genom att generera begränsningar på tidtabelläggningsen, begränsningar som tar bort dåliga och ineffektiva lösningar ur personalplaneringsperspektivet och bevarar de "goda" och effektiva lösningarna. Fokus för detta arbete är på tid och krav på tid, inte direkt på kostnader utan kvalitativt på kostnader.

Eftersom tidtabellen inte är fastställd så går det inte att helt avgöra kostnaden för olika lösningsalternativ. Ansatsen i TUFF-PO är inte att försöka konstruera personalomlopp och inte heller personalslingor utan att titta på arbetsperioder för att utifrån dessa försöka finna karaktärer som tycks gynna bra personalomlopp i senare planeringsskeden. Utgångsmaterial för detta är en specifikation av en tidtabell, där avgångs- och ankomsttider inte är fastställda utan tillåts variera inom vissa intervall. Dessa karaktärer används sedan för att begränsa utrymmet för avgångs- och ankomsttiderna för de tåg som omfattas av specifikationen. Mer tekniskt bidrar TUFF-PO med inskränkningar på avgångs- och ankomsttiderna men också med ytterligare relationer mellan olika tåg och mellan olika ankomst/avgångstider vilka relateras då det är nödvändigt för att säkerställa effektiva lösningar i efterföljande planeringssteg (t.ex. i personalplaneringssystemet OP). Det är även en uppgift för TUFF-PO att upptäcka om tidtabellspecifikationen innehåller avgångar som inte på ett effektivt sätt kan ingå i turförteckningar. Ytterligare en avsikt med TUFF-PO är att ge indata till konstruktionen av personalomlopp, exempelvis att föreslå arbetsperioder, som verkar vara nödvändiga för att det färdiga personalomloppet skall bli bra.

Denna rapport kan sägas bestå av två delar. Den första delen, till och med stycke 4, omfattar idéer, krav och diskussion kring vad ett verktyg som TUFF-PO skall innehålla. Stycke 5 omfattar en beskrivning av en prototypimplementering, som validerar huvudaspekterna av de tidigare beskrivna kraven och ideerna. Mycket av det som beskrivs i stycke 5 är relaterat till hur personalplaneringssystemet OP genererar förslag till slingor, den s.k. pairing-delen. Eftersom TUFF-PO arbetar med tidfönster är det inte möjligt att direkt använda OPs pairing-modul, men de metoder som ligger bakom realiseringen av modulen bör delvis kunna användas för att få effektiva beräkningar, liksom de modeller som används för att generera förslag på personalslingor och personalomlopp i OP.

Det bör påpekas att prototypimplementeringen har tagit fasta på att validera funktionen hos det föreslagna systemet, och inte i huvudsak på effektiviteten. Prototypen är ändå förhållandevis minneseffektiv men har lång exekveringstid beroende på en del ur effektivitetshänseende enkla lösningar. Kort sagt, exekveringstid var inte ett av huvudmålen med prototypen.

Rapporten förutsätter en del bakomliggande kunskaper i planering och schemaläggning av resande personal, hur dagens situation ser ut, hur OP fungerar samt hur problemet hanteras idag.

1.1 Tidtabell och turförteckning

En tidtabell är en mängd *tripp*, där varje tripp betecknar vad som i vardagligt tal är ett tåg, tidtabellagt med avgångsstation och ankomststation. Varje tripp är en sekvens odelbara arbetsuppgifter, kallade *ben*, avsedda att utföras av en lokförare. Dessa ben byggs upp av atomära arbetsuppgifter på låg nivå, i vårt fall av enskilda traverseringar av stationssträckor vilka benämns *slot* i denna text. Vi introducerar även ett nytt begrepp *jobb*, vilket består av allt arbete (ett antal ben och annat arbete) mellan två arbetsuppehåll, där arbetsuppehåll antingen är en rast eller en vila. Vi har vidare följande terminologi, vilken försöker ansluta till den gängse:

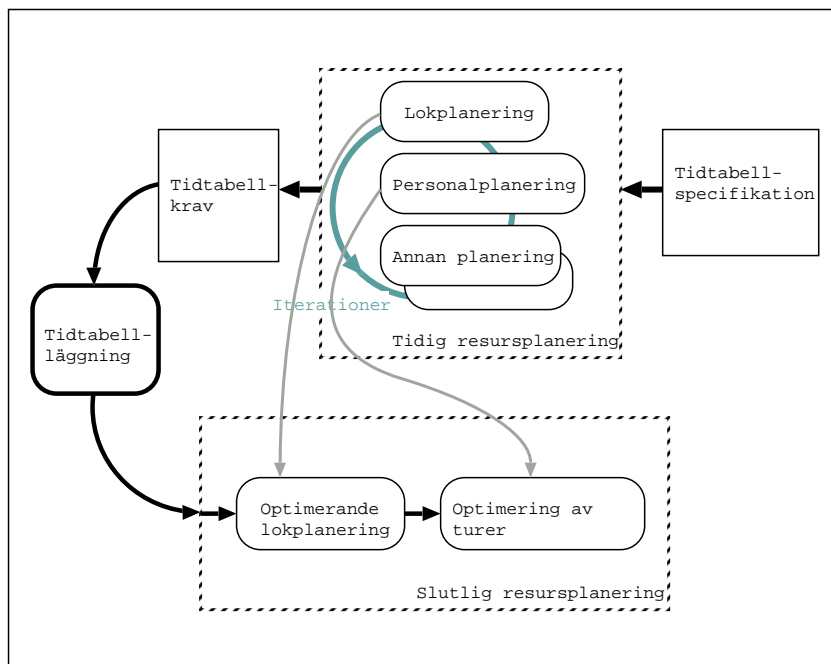
En *arbetsperiod* är en sekvens av arbetsuppgifter som motsvarar en dags arbete utan att vara knutet till kalenderdygn. Några av arbetsuppgifterna i en arbetsperiod är de ben som finns i tidtabellen. Andra är härledda från regler om hur arbetsperioder får skapas och arbetsuppgifter på bangårdarna som specificeras på något annat sätt än i tidtabellen. I ett veckoarbetsschema för lokförare separeras arbetsperioderna av *vilor*.

En *personalslinga* är en sekvens av arbetsuppgifter som motsvarar det arbete en lokförare utför från det att lokföraren börjar sitt arbetet vid sin stationeringsort till det att denne återvänder stationeringsorten. En personalslinga är också det arbete en lokförare utför under minst en arbetsperiod och sällan fler än två arbetsperioder. Arbetsperioderna i en personalslinga separeras av *överliggningar*, det vill säga vilor på bortastation. Med bortastation menas en annan station än den stationeringsort där personalslingan har sin början och slut.

Ett *personalomlopp* är en samling personalslingor. Tågplanearbetet skall bland annat resultera i en tidtabell och ett *personalomlopp* så att varje ben i tidtabellen finns i någon personalslinga i personalomloppet. I en personalslinga finns även arbetsuppgifter som inte är ben i tidtabellen.

1.2 Ansats i TUFF-projektet

Den ansats som föreslås i TUFF-projektet är att dela upp tågplanearbetet i två steg. I det första steget konstrueras en tidtabell, låt oss kalla den *tidtabellspecifikationen*, där benens avgångstider inte är fixerade utan kan variera mellan en övre och en undre gräns. En sådan variabel tidpunkt kan realiseras med en s.k. *domänvariabel* (en problemvariabel med tillhörande inskränkning till värden inom en undre och övre gräns, ofta heltalsvärden). Det intervall den kan variera inom kallas *domän*, *slack* eller *tidfönster*. Tidtabellspecifikationen analyseras med avseende på lokomlopp och personalomlopp. I det andra steget konstrueras en tidtabell med fixerade tider ett lokomlopp och ett personalomlopp, i nämnd ordning och där alla dessa delar baserar sig på resultatet av analyserna av tidtabellspecifikationen. I fortsättningen kommer vi att med *tidtabellen* mena den tidtabell med fixerade tider som konstrueras i detta andra steg. Processerna att konstruera lokomlopp och personalomlopp i det andra steget kommer i fortsättningen att benämnas *optimering av lokomlopp* respektive *optimering av turer*.



Låt oss med TUFF-PO (där PO står för PersonalOmlopp) avse den del av analysen av tidtabellspecifikationen som avser optimering av slingor.

1.3 Typ av schemalägningsproblem

Optimering av lokomlopp och turer från en given tidtabell kan ses som ett schemalägningsproblem av typen "job shop scheduling," tillsammans med vissa specifika krav. Med ett problem av typen "job shop scheduling," menas att till var och en av ett antal resurser ordna ett antal specificerade uppgifter (engelska tasks), där det till varje uppgift hör en starttid och en tidsutsträckning. Antalet resurser kan antingen vara givet eller så handlar problemet om att minimera antalet resurser. I fallet med optimering av turer så utgörs uppgifterna av benen i tidtabellen och resurserna av lokförare.

Det specifika med optimering av slingor är:

- Tiden är cyklisk, det vill säga genomförandet (eller avvecklingen) av tidtabellen upprepas cykliskt, typiskt över en vecka.
- Benen har förutom en bestämning i tiden också en geografisk bestämning och resurserna skall återvända till den plats där de startade eller åtminstone till en plats i närheten av den plats där de startade.
- Arbetstidsregler ställer krav på personalslingorna.

Om vi betraktar problemet att konstruera ett personalomlopp från en tidtabellspecifikation har vi ett problem som även har följande specifika karaktär:

- Avgångstiderna varierar inom ett intervall (dvs skall anta ett värde inom intervallet i den färdiga tidtabellen), vilket betyder att ordningen hos uppgifterna (benen) inte är fixerad.

2 En översiktlig beskrivning av TUFF-PO

2.1 Avsikten med TUFF-PO

Avsikten med TUFF-PO är i första hand att svara på frågan hur tidtabellen konstrueras så att det därefter går att konstruera ett bra personalomlopp med optimerande verktyg (t.ex. OP). För att svara på denna fråga är ett av resultaten av TUFF-PO en samling värderade krav, där värdet hos ett krav anger hur betydelsefullt det är att kravet satisfieras för att ett bra personalomlopp skall kunna konstrueras. Låt oss i fortsättningen använda *tidtabellkraven* som namn på dessa krav.

En annan avsikt är att svara på frågan om det finns problem hos tidtabellspecifikationen när det gäller personalomlopp, till exempel om intervallet för en avgångstid behöver ökas något, eller skjutas till ett annat tidsområde, för att undvika en dålig personalslinga. Låt oss benämna de utdata från TUFF-PO som svarar på denna fråga för *specifikationskraven*.

Ytterligare en avsikt är att ge indata till konstruktionen av personalomlopp, exempelvis att föreslå personalslingor som verkar vara nödvändiga för att personalomloppet skall bli bra. De utdata från TUFF-PO som svarar mot denna avsikt kallas *personalomloppskraven*. Ett annat exempel på personalomloppskrav är de passresor som finns i de arbetsperioder som TUFF-PO anser vara väsentliga.

Ett väsentligt utdata från TUFF-PO är olika antaganden som TUFF-PO gör. Ett typiskt exempel är följande. Antag att TUFF-PO funnit en värdefull arbetsperiod där benet b_1 föregås av benet b_2 , b_1 är sista benet i en tripp och b_2 är första benet i en (annan) tripp. Hur mycket arbete som måste utföras av lokföraren mellan b_1 och b_2 , alltså sådant arbete som inte specificeras i tidtabellspecifikationen, beror då på om samma lok ingår i de två tripperna. Skillnaden är så stor att den inte kan bortses från. Eftersom lokomloppet inte är konstruerat i detta skede finns det heller inte något sätt att för TUFF-PO att avgöra om det är samma lok i de två tripperna. Lösningen kan vara, beroende på situation, att anta att det är samma lok i de två tripperna och uttrycka detta som krav (i termer av tid) i utdata.

2.2 Indata till TUFF-PO

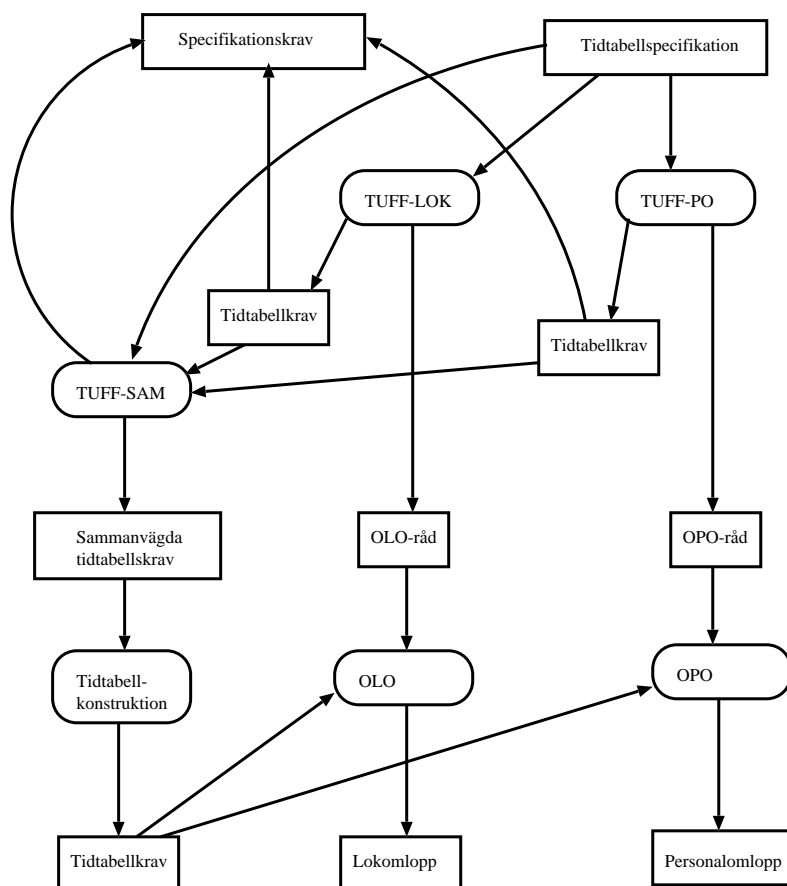
Indata till TUFF-PO är väsentligen de samma som indata till konstruktion av personalomlopp i OP, men där tidtabellen ersätts av tidtabellspecifikationen och lokomloppet möjligen ersätts av den del av analysen av tidtabellspecifikationen som avser optimering av lokomlopp.

Andra indata rör specifika förutsättningar för raster, överliggningar och det arbete som skall utföras av personalen. Det är betydelsefullt att det går att kategorisera orterna. Bland annat vill vi skilja mellan följande kategorier av orter:

- Stationeringsorter, orter där personalslingor börjar och slutar.
- Överliggningsorter, orter där överliggning kan ske.
- Rastorter, orter där rast kan tas.
- Orter med tillgång till stationär personal.

2.3 Integrering av TUFF-PO i tågplanarbetet

Följande bild ger en översikt över delar av tågplanarbetet med TUFF-PO integrerat, så som det föreslås i denna rapport. I bilden används ovaler för aktiviteter och rektanglar för data. En tidtabellspecifikation är indata till tågplanarbetet och specifikationskrav, tidtabell, lokomlopp och personalomlopp är utdata från tågplanarbetet. Tågplanarbetet kan innehålla in- och utdata som bortses från i denna bild.



TUFF-LOK refererar till den del av analysen av tidtabellspecifikationen som avser optimering av lokomlopp. På samma sätt som TUFF-PO resulterar i tidtabellkrav resulterar också TUFF-LOK i krav på tidtabellen. Kraven från TUFF-PO och TUFF-LOK kan vara i konflikt med varandra. Det vill säga, det som gynnar eller är nödvändigt för ett bra lokomlopp kan motverka en bra personalomlopp och vice versa. Den lösning som föreslås i denna rapport på detta problem är att införa en sammordnare, låt oss kalla den TUFF-SAM, som avgör vilka krav som skall prioriteras då TUFF-PO och TUFF-LOK resulterar i krav som är i konflikt med varandra. Det är detta som är orsaken till att tidtabellkraven från TUFF-PO ges värden som anger graden av betydelse.

TUFF-SAM svarar alltså på frågan hur tidtabellen konstrueras för att det skall gå att konstruera både ett bra personalomlopp och ett bra lokomlopp och det utdata från

TUFF-SAM som svarar på denna fråga fås genom en integration av kraven på tidtabell-specifikationen från TUFF-PO och TUFF-LOK. Nedan förklaras några av de i bilden förekommande in- och utdata:

Specifikationskrav Både TUFF-SAM och TUFF-LOK bör, i analogi med TUFF-PO, också svara på frågan om det finns problem med tidtabellspecifikationen gällande konstruktionen av lokomlopp och personalomlopp. Det utdata som svarar på dessa frågor kallar vi specifikationskrav. Om det exempelvis finns ett ben till vilket det inte samtidigt finns en bra arbetsperiod och en bra lokslinga bör TUFF-SAM kunna leverera detta som en del av specifikationskravet.

Tidtabellkrav Tidtabellkrav är utdata från TUFF-komponenterna till det fortsatta tågplanearbetet och resultatet av att utföra respektive TUFF-komponent. Tidtabellkravet består av tidtabellspecifikationen med reducerade domäner till domänvariablerna, tillsammans med funna nödvändiga relationer inom tripper och mellan tripper (för TUFF-PO t.ex. begränsningar på ankomst- och avgångstider p.g.a. begränsningar på total arbetad tid, eller p.g.a. byten av tågförare mellan olika tripper).

Sammanvägda Tidtabellkravet Det sammanvägda tidtabellkravet är huvudutdata från TUFF-delen till det fortsatta tågplanearbetet och resultatet av den sammanställning av krav som utförs i TUFF-SAM. De olika tidtabellkraven måste sammordans av TUFF-SAM eftersom de tillsammans kan vara oförenliga.

OLO OLO står för optimering av lokomlopp.

OPO OPO står för optimering av turer.

OPO-Råd Står för det utdata från TUFF-PO som vi tidigare kallat personalomloppskraven. Dessa utdata ses som goda råd till optimeringen av turer.

OLO-Råd I analogi med OPO-Råd står OLO-Råd för indata till optimeringen av lokomlopp från TUFF-LOK.

Bilden anger att TUFF-PO och TUFF-LOK sker före TUFF-SAM. Det är troligt att detta är en för enkel bild. De tre TUFF-delarna kan komma att behöva itereras. Det vill säga, nya separata analyser tidtabellspecifikationen med avseende på personal- och lokomlopp kan behövas efter en sammanställning av krav från tidigare sådana analyser. En mer rättvisande bild fås då genom att ersätta de tre TUFF-delarna med en enda TUFF-oval.

2.4 Delarna i TUFF-PO

Följande avsnitt beskriver delarna i TUFF-PO på ett översiktligt sätt. Delarna ligger i sekvens dvs först görs en bytesplatsanalys, sedan benkonstruktion vartefter arbetsperiodanalysen utförs.

2.4.1 Bytesplatsanalys

En av de tänkta analyserna i TUFF-PO är bytesplatsanalysen som går ut på att finna lämpliga orter där lokförare kan byta och ta rast. De aspekter som beaktas då är framförallt vilka orter det är möjligt att byta av på, att ta rast på, samt tiden från starten eller slutet på en tripp till möjliga orter där byte och rast kan ske.

Det kan tänkas vara fallet att det för vissa tripper endast finns ett högst begränsat antal möjliga bytesplatser och rastorter, vilket resulterar i ett fåtal bra personalslingor som innehåller delar av denna tripp. En avsikt med bytesplatsanalysen är att kartlägga dessa personalslingor.

En annan avsikt är att klarlägga om vissa val av bytesplatser resulterar i fler möjliga personalslingor. Detta borde då öka möjligheten att konstruera ett bra personalomlopp. Exempelvis borde fler personalslingor kunna skapas om man, för tripper nära i tid och rum, försöker lägga bytena och rasterna till få orter i stället för många.

Man kan ha olika ansatser vad det gäller resultatet av bytesplatsanalysen. En ansats är en fixerad mängd bytesplatser som gäller samtliga tripper. En annan ansats är att till varje potentiell bytesplats associera ett antal tripper. En tredje ansats är att dela in dygnet i delar och låta mängden bytesplatser och rastorter bestämmas av vilken del på dygnet bytet (och rasten) inträffar.

2.4.2 Benkonstruktion

En av ansatserna i TUFF-PO är att använda resultatet av bytesplatsanalysen till att slå samman sekvenser av slottar mellan de identifierade bytes-stationerna i tripper i tidtabellspecifikationen och att betrakta dessa sekvenser av slottar som odelbara arbetsuppgifter i den övriga analysen. I fortsättningen använder vi *ben* endast till att beteckna dessa sammanslagna sekvenser av slottar och sammanslagningen kallar vi *benkonstruktion*. Bytesplatsanalys och benkonstruktion utgör alltså ett försteg till den fortsatta analysen av arbetsperioder.

2.4.3 Arbetsperiodanalys

Arbetsperiodanalysen består av följande delar: 1) generering av en mängd arbetsperioder, och 2) undersökning av denna mängd med avseende på de frågor som TUFF-PO avser att svara på och produktion av utdata. Med en arbetsperiod menas det schemalagda arbete som en lokförare utför mellan två vilor, se arbetstidsreglerna nedan för en precis definition av arbetsperiod.

Vid genereringen söker man en mängd arbetsperioder med hög kvalitet och som på olika sätt anses vara representativ för tidtabellspecifikationen. För att en arbetsperiod skall ha hög kvalitet skall den i första hand ha mycket schemalagt arbete och i andra hand vara kort, dvs vara kompakt. För att mängden arbetsperioder skall vara representativ skall till exempel varje ben, om möjligt, finnas i ett visst antal arbetsperioder. Redan vid denna generering kan brister hos tidtabellspecifikationen upptäckas som resulterar i specifikationskrav.

Vid undersökningen söker man i första hand finna det som är nödvändigt för att ett bra personalomlopp skall kunna konstrueras och i andra hand det som verkar gynna bra personalomlopp.

De två stegen, generering och undersökning av arbetsperioder, itereras. Exempelvis kan det som vid undersökningen upptäcks vara nödvändigt fixeras och det som är omöjligt elimineras för att därefter eventuellt göra en ny generering.

2.5 Analyser som ej omfattas av TUFF-PO

Ansatsen i TUFF-PO är inte att försöka konstruera omlopp och inte heller personalslingor utan att titta på arbetsperioder för att utifrån dessa försöka finna karaktärer hos tidtabellspecifikationen som tycks gynna ett bra personalomlopp. Från de analyser som görs i TUFF-PO kommer det inte att framgå vad den exakta resursåtgången är för att genomföra tidtabeller som satisfierar tidtabellspecifikationen. Inte heller kommer det att framgå vad kostnaden är för olika arbetsperioder eller vad kostnaden är för att avveckla tidtabeller som satisfierar tidtabellspecifikationen. Detta beror på att alla fakta inte är kända, t.ex. saknas information om lokomlopp. Istället för att ansätta verkliga kostnader (i kronor) kommer arbetsperioder att var för sig att värderas, så att ett högt värde hos en arbetsperiod skall ses som att arbetsperioden gynnar i verkligheten billiga personalomlopp.

3 Arbetstidsregler

Ansatsen i detta projekt är att tillämpa arbetstidsreglerna på bästa sätt utan att göra avsteg från de ursprungliga idéerna med arbetstidsreglerna. Tillämpningen av arbetstidsreglerna kommer att skilja sig något från hur de tillämpas i tågplanearbetet och i verktyget OP i dagsläget. Avsikten med detta är inte bara att möjliggöra och förenkla TUFF-PO, utan skall även ses som ett förslag till en anpassning av arbetstidsreglerna som bättre passar det tågplanearbete som avhandlas i denna rapport. Arbetstidsreglerna borde även för övrigt vid optimeringen av turer tillämpas på ett sådant sätt att automatisering inte försvåras.

Ett personalomlopp kan anses ha ett antal olika uppgifter så som den används i dagens tågplanearbete:

- Den är underlag för den personliga schemalaggningen (bemanningsplaneringen, eng. "rostering") som tar vid där tågplanearbetet slutar.
- Den svarar på frågan om tidtabellen går att genomföra.
- Den svarar på frågan om personalslingor satisfierar arbetstidsreglerna.
- Den anger en kostnad för varje personalslinga och därmed kostnaden för att genomföra tidtabellen.

I det följande bortses från regler för betalning av lokförare och det antas att kostnaden huvudsakligen bestäms av antalet lokförare som personalomloppet kräver och till någon del av vissa andra faktorer som kostnad för överliggning på viss ort och extra kostnad för långa arbetsperioder. Antalet förare som krävs antas vara relaterat till personalomloppet.

Man bör observera att ett personalomlopp så som den används i dagens tågplanearbete inte till fullo ger omedelbara svar på ovanstående frågor. Personalomloppet anger inte hur personalslingor sätts ihop till veckoarbetsscheman. Exempelvis följer det inte alltid omedelbart från personalomloppet vilket antal lokförare som krävs för att veckoarbetstiden skall hålla sig inom gränserna.

Vissa lokföraraktiviteter som sker på bangårdar kommer i det följande att hanteras på ett schablonmässigt sätt. I arbetet ingår buffertar mot förseningar och på större bangårdar finns stationär personal som kan byta av en lokförare. En precis schemaläggning av bangårdsarbetet kräver detaljkunskaper om arbetet som utförs på bangårdarna som oftast endast de personer som arbetar på bangårdarna besitter och som inte bör vara indata till TUFF-PO. I det framtida tågplanearbetet kan man tänka sig att optimeringen av turer delas upp i två steg där den andra delen avser en detaljerad schemaläggning av bangårdsarbete och den första delen endast skapar tillräckligt utrymme för detta arbete.

Grundat på uppfattningen att den optimala arbetsperioden, ur både operatörens och lokförarnas perspektiv, består av 5 timmar arbete, 30 minuter rast och åter 5 timmar arbete så har vi valt följande förenklingar av arbetstidsreglerna:

- Vi bortser helt från möjligheten till måltidsuppehåll och kräver istället att rast tas senast efter 5 timmar arbete.
- Vi bortser från begränsningar på längden hos arbetsperioder.
- Vi bortser i detta arbete även från att nattarbete skiljer sig från dagarbete, eftersom det inte går att avgöra hur mycket av ett ben som kommer att ligga inom nattskift respektive dagskift då tidtabellen inte är fastställd ännu.

Förhoppningen är att den större friheten som de variabla avgångstiderna ger också skall ge större möjligheter att finna arbetsperioder som ligger nära den optimala.

3.1 Schemalagda aktiviteter

Som vi nämnt tidigare så är en del av TUFF-PO att analysera en tidtabellspecifikation genom att konstruera och undersöka en mängd arbetsperioder. De olika aktiviteter som kan ingå i dessa arbetsperioder är:

- Tågtjänst
- Växling
- Passresa
- Byte
- Kringtider
- Upphåll

Låt oss gå igenom vad som gäller för var och en av dessa aktiviteter.

3.1.1 Tågtjänst

Alla arbetsuppgifter i en personalslinga som är ben i tidtabellspecifikationen kallas tågtjänst och omvänt utgörs all tågtjänst i en personalslinga av ben i tidtabellspecifikationen.

3.1.2 Växling

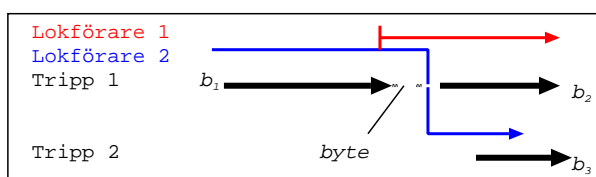
Ett typiskt exempel på hur aktiviteten växling uppkommer är när följande är planerat. En lokförare skall från en station köra ut till en bangård, utföra växling på bangården och sedan köra tillbaka till stationen igen. Körningen från stationen till bangården och åter till stationen är ben i tidtabellspecifikationen. Växlingen är dock allt som oftast inte a priori explicit given som indata till tågplanearbetet. Om vi då försöker låtsas som om inte växlingen finns kan detta leda till problem. Ofta skulle detta resultera i att vi lägger in annat arbete i personalslingor där växlingen skulle ligga. Detta betyder att vi kräver att en annan lokförare utför växlingen vilket inte alltid är möjligt, det kanske inte ens finns någon annan personal på bangården. Således förutsätts det att den från början planerade växlingen finns explicit representerad i tidtabellspecifikationen.

3.1.3 Passresa

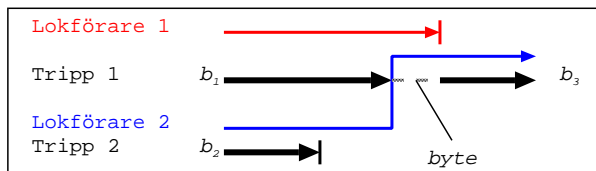
Passresor är resor som lokförare gör för att ta sig till eller från den plats där tågtjänsten eller möjligen växlingen skall utföras. TUFF-PO gäller i första hand schemaläggning av lokförare på godståg och dessa åker oftast och helst inte passresor på godståg. Därför är passresorna inte ben i specifikationstidtabellen, vilket underlättar beräkningen då vi kan anta att alla passresor sker efter en fastställd tidtabell som ges "utifrån" som indata. En möjlig ytterliggare förenkling i samband med prototyputveckling av systemet är att ansätta passresornas längd (i tid räknat) schablonmässigt och låta dessa bestämmas som en funktion av avståndet mellan de två orter som passresan företas, exempelvis genom ett antal minuter per kilometer. Vid optimeringen av turer är det väsentligt att veta vilka passresor som antagits vara möjliga av TUFF-PO. Därför skall detta uttryckas som ett personalomloppskrav. I ett fullt idriftsatt verktyg bör givetvis bästa möjliga data användas här, t.ex. kända tidtabeller mm.

3.1.4 Byte

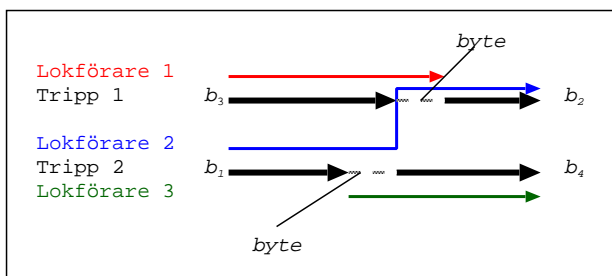
Med byte menas att lokföraren byter lok. Huruvida ett byte förekommer eller inte framgår av personalomloppet tillsammans med hur benen är ordnade i tripper i tidtabellspecifikationen. Om det första benet i en arbetsperiod inte är det första benet i en tripp, så inleder lokföraren sin arbetsperiod med att byta av den lokförare som körde det föregående benet i trippen och då föregås benet i arbetsperioden av ett byte.



På samma sätt, om det sista benet i en arbetsperiod inte är sista benet i en tripp så efterföljs det sista benet för lokföraren av ett byte.



På analogt sätt kan byte också finnas mellan två ben i en arbetsperiod. Låt b_1 och b_2 vara två på varandra följande ben i en arbetsperiod. Antag att b_1 och b_2 inte tillhör samma tripp. Om b_1 inte är det sista benet i en tripp, så efterföljs b_1 i arbetsperioden av ett byte som gäller loket till benet b_1 . Om b_2 inte är det första benet i en tripp, så föregås b_2 i arbetsperioden av ett byte som gäller loket till benet b_2 . Det vill säga om varken b_1 är det sista benet i en tripp eller b_2 är det första benet i en tripp så förekommer två byten mellan b_1 och b_2 .

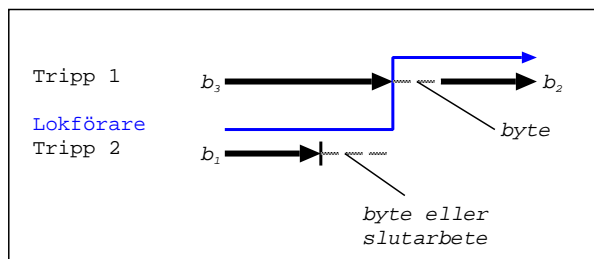


3.1.5 Kringarbete

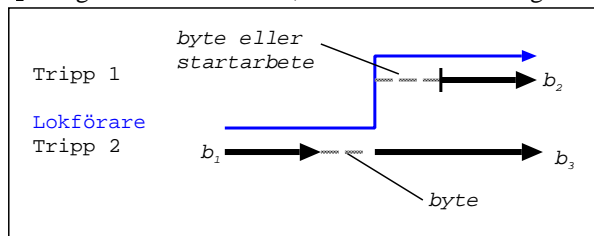
Vissa av de arbeten som utförs av lokförare kommer vi att slå samman under beteckningen *kringarbete*. Också detta arbete bestäms av hur benen är ordnade i tripper. Om det första benet i en arbetsperiod är det första benet i en tripp, så inleder lokföraren sin arbetsperiod med visst arbete för att loket skall kunna tas i drift och då föregås benet i arbetsperioden av ett visst kringarbete, låt oss kalla det *startarbete*. På samma sätt, om det sista benet i en arbetsperiod inte är sista benet i en tripp så efterföljs det sista benet av ett visst kringarbete, exempelvis för att loket skall kunna tas ur drift, låt oss kalla det *slutarbete*.

På analogt sätt kan kringarbete också finnas mellan två ben i en arbetsperiod. Låt b_1 och b_2 vara två på varandra följande ben i en arbetsperiod. Vi får följande fall:

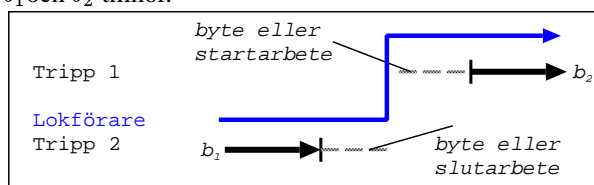
1. Antag att b_1 och b_2 inte tillhör samma tripp. Om b_1 är det sista benet i en tripp och b_2 inte är det första benet i en tripp, så vet vi att b_1 och b_2 inte tillhör samma lok och då efterföljs b_1 av ett byte eller slutarbete som gäller loket till benet b_1 i arbetsperioden. Vi antar förenklat att b_1 efterföljs av ett slutarbete, vilket tidsmässigt även ger utrymme för ett byte av lokförare.



2. Antag att b_1 och b_2 inte tillhör samma tripp. Om b_2 är det första benet i en tripp och b_1 inte är det sista benet i en tripp, så vet vi också att b_1 och b_2 inte tillhör samma lok och då kan b_2 föregås i arbetsperioden av ett startarbete som gäller loket till benet b_2 , beroende på om loket var avställt innan. Vi antar förenklat att b_2 föregås av ett startarbete, eftersom detta också ger utrymme för ett byte.



3. Om b_1 är det sista benet i en tripp och b_2 är det första benet i en tripp, så vet vi inte om b_1 och b_2 är allokerat till samma lok, eftersom lokomloppet inte är konstruerat. I detta fall antar vi att samma lok ingår i de två tripperna som benen b_1 och b_2 tillhör.



En motivation till detta antagande är att det intuitivt borde vara bra även för lokomloppet att samma lok ingår i de två tripperna som benen b_1 och b_2 tillhör, om den aktuella arbetsperioden skall tas hänsyn till. Detta antagande skall uttryckas av ett personalomloppskrav. Det kringarbete som lokföraren utför i detta fall kallar vi *mellanarbete* och kan handla om att flytta loket och koppla ihop det med en annan uppsättning vagnar. Det är en fördel för personalplaneringen om mellanarbetet är såpass långt så att det finns möjlighet till byte av lokförare.

3.1.6 Uppehåll

Uppehåll är den aktivitet som utgör det återstående i en personalslinga, efter det att de andra aktiviteterna bestämts.

3.2 Förslag på tider hos konstanter

Tiderna för byten och kringarbeten är konstanter i TUFF-PO och varierar med loktyp och med station. Vi har här koncentrerat oss på Rc-lok.

De aktiviteter som motsvarar startarbete i tågplanarbetet i dag är klargöring(c:a 14 minuter) och k_disp (dispositionstid efter klargöring), och de aktiviteter som motsvarar slutarbete är a_disp (dispositionstid före avställning) och avställning(c:a 6 minuter). Mellanarbete motsvaras av dispositionstid. Tiden för a_disp och k_disp är stationsberoende, så start- och slutarbetena är också stationsberoende. Låt stn beteckna en station. Förslagen på tider kan sammanfattas enligt följande:

- byte = 15 minuter
- startarbete(stn) = 14 minuter + $k_disp(stn)$
- slutarbete(stn) = 6 minuter + $a_disp(stn)$
- mellanarbete = 30 minuter.

Motivet till att välja mellanarbetet till 30 minuter är att det oftast inte behövs mer än 30 minuter och om det skulle behövas mer tid så kan mellanarbetet ersättas av två byten, då tiden för två byten är densamma.

3.3 Arbetstidsregler

3.3.1 Definitioner

Detta avsnitt ger namn åt delar av en personalslinga.

Viloperiod på bortastation Ett uppehåll på överliggningsort med en längd på minst 7 timmar.

Arbetsperiod En personalslinga är uppbyggd av arbetsperioder åtskiljda av viloperioder på bortastation Observera att vid 0 viloperioder kommer personalslingan bestå av en arbetsperiod.

Vanlig rast Ett uppehåll med längd på minst 30 minuter.

Växlingsrast En 40 minuter lång del av en växling som är minst 3 timmar.

Rast En vanlig rast eller en växlingsrast.

Jobb En arbetsperiod är uppbyggd av jobb åtskilda av raster eller vilor.

Arbete i arbetsperiod Arbetsperioden exklusive vanliga raster och avslutande sekvenser av omväxlande passresor och uppehåll kallas *arbetet* i arbetsperioden.

Observera att:

- Det kan finnas tid som inte är arbete (tågtjänst) i ett jobb.
- Rast på växling är en aktivitet av slaget växling och räknas som arbete och inte uppehåll.
- Viloperiod räknas som rast.

3.3.2 Arbetstidsregler

1. Ett jobb får vara högst 5 timmar.
2. Arbetet i en arbetsperiod får vara högst 10 timmar.
3. Om arbetet i en arbetsperiod består av mer än 3 timmar arbete mellan 22 och 6, så får arbetet i arbetsperioden vara högst 8 timmar.
4. En personalslinga får inte innehålla två arbetsperioder i rad med mer än 3 timmar arbete mellan 0 och 6.

Vi kommer inte att fullt ut ta hänsyn till punkterna 3 och 4, eftersom det utifrån tidtabellspecifikationen inte går att avgöra om och hur mycket av ett ben som ligger inom de angivna klockslagen.

4 Arbetsperiodanalys

Detta avsnitt ger en mer detaljerad beskrivning av arbetsperiodanalysen än den överiktliga beskrivningen ovan.

4.1 Tidtabell och tidtabellspecifikation

En tidtabell består av en mängd tripper. Varje tripp består av ett antal ben. Till ett ben associeras identifikation, startstation, slutstation, avgångstid, ankomsttid och genomförandetid, där ankomsttiden är genomförandetiden plus avgångstiden. I tidtabellen är dessa konstanter. Notera återigen att en tidtabellspecifikation skiljer sig från en tidtabell därigenom att avgångstiderna i benen är domänvariabler (se kapitel 1.2) och alltså inte konstanter.

En tidtabell beskriver ett system med en diskret cyklisk tid. Låt oss kalla detta system för tidtabelltiden. Varje tidpunkt är ett heltal gånger en konstant atomär tid.

4.2 Idéer om vilken mängd av arbetsperioder som skall genereras

En av avsikterna med den genererade mängden arbetsperioder är att ur denna kunna utnyttja det som möjliggör många arbetsdagar, ur den genererade mängden, till att finna vad som gynnar ett bra omlopp. Vi antar att det är möjligt att generera endast en bråkdel av den totala mängden möjliga arbetsperioder. Därför måste arbetsperioder genereras med urskiljning. Det är då naturligt att man försöker välja ut bra arbetsperioder. Vi måste också ta hänsyn till att analysen av arbetsdagar skall säga något om ett personalomlopp som inkluderar alla ben i tidtabellspecifikationen. En idé är därför att för varje ben generera ungefär lika många arbetsperioder, om detta är möjligt. Det betyder att vi kan komma att acceptera mindre bra eller till och med dåliga arbetsperioder. Vi bör då ha ett argument för att den genererade mängden arbetsperioder lämpar sig för den nämnda avsikten.

Som vi tidigare nämnt skall arbetsperiodanalysen i första hand undersöka det som är nödvändigt. Denna undersökning utgår i första hand från ben som förekommer i få arbetsperioder eller i få bra arbetsperioder.

4.3 Huvudidéer om hur genereringen går till

Genereringen av arbetsperioder styrs av två idéer:

- Genereringen utgår från ett ben i taget.
- En stor mängd av jobb genereras, om möjligt alla, vilket bildar basen för genereringen av arbetsperioder.

Den första idén är att sekvenser av ben (jobb eller möjligen hela arbetsperioder) byggs upp från ett ben i taget och genom att lägga till ben i båda ändarna av den ännu inte färdiga sekvensen. Anledningen till att bygga upp sekvensen genom att lägga till ben i båda ändarna är alltså att vi är intresserade av att generera en delmängd av den totala mängden av arbetsperioder i vilket benet ingår. Den totala mängden av arbetsperioder i vilket ett ben ingår kan ju genereras genom att starta med detta ben och lägga till ben i båda ändarna av den ännu inte färdiga arbetsperioden.

Den andra idén är att så mycket som möjligt försöka uttömma mängden av jobb och spara dessa i en struktur som gör sökning snabb vid den efterföljande genereringen av arbetsperioder.

Fördelen med den första metoden är att:

- Det är lätt att kontrollera att antalet arbetsperioder per ben blir jämt fördelade över benen.
- Det är lätt att kontrollera om det finns ben som inte ingår i någon arbetsperiod eller bara i arbetsperioder med låg kvalitet.
- När en tillräcklig mängd arbetsperioder genererats utgående från ett visst ben, så behövs inte detta ben i den fortsatta genereringen.

Fördelen med den andra metoden är att:

- En stor mängd arbetsperioder kan genereras snabbare.
- Det är lättare att konstruera arbetsperioder som börjar och slutar på samma ställe.

Dessa två metoder kan kombineras genom att först använda metoden att generera arbetsperioder från jobb och sedan använda genereringen som utgår från givet ben för kompletteringar och kontroller.

4.4 Generera det bästa först

Alla sätt att generera arbetsperioder eller jobb avser att generera det bästa först, såvida det inte handlar om en uttömmande generering. Detta innebär att genereringarna baseras på värderingar av vad som är bäst. Dessa värderingar är av två slag: värderingar som kan göras före genereringen och värderingar som görs under genereringen. Före genereringen kan till exempel det bästa efterföljarbenet till varje ben bestämmas medan värderingen av arbetsperioder sker vid genereringen. Vid generering från ett ben i taget är det lämpligt att använda sig av prioritetslistor som i ordning anger vilka de bästa efterföljande och föregående benen är till ett givet ben. Värderingar är väsentliga både vid generering och undersökning av en mängd arbetsperioder och vi återkommer till dem längre fram.

4.5 Generering utgående från rastvändningar

Ytterligare en idé är att utgå från *rastvändningar* vid generering av arbetsperioder. Med en rastvändning menas här ett två ben som kan skjutas isär tillräckligt för att en rast skall kunna förläggas mellan dem. Vid en sådan generering används då en värdering av raster baserad på utdata från bytesplatsanalysen. Ett motiv till att använda denna metod ligger i uppfattningen att valet av bytesplatser och rastplatser är avgörande för om ett bra personalomlopp kan skapas.

4.6 Villkor

Tidtabellspecifikationen består av ännu ej fixerade avgångstider och uppehåll, realiserat genom domänvariabler (se stycke 4.9.3). Betrakta kravet på tidtabellspecifikationen att en viss arbetsperiod måste gå att konstruera. Detta krav liksom alla krav som arbetsperiodanalysen utmynnar i är villkor på domänvariablerna i tidtabellspecifikationen. Det villkor på domänvariablerna som motsvarar kravet att arbetsperioden a går att konstruera kallar vi *arbetsperiodvillkoret* till a . Ett arbetsperiodvillkor kan delas upp i två delar: *arbetstidsvillkor* och *vändvillkor*. Arbetstidsvillkoret säger att arbetstidsreglerna gäller, och kan delas upp ytterligare, bla innefattas *vilovillkoret*, dvs att lokföraren får avtalsenlig vila mellan arbetsperioderna. Vändvillkoret säger följande: för varje par av ben b_1 och b_2 där b_2 är det ben som följer omedelbart efter b_1 i den aktuella arbetsperioden, så är slutstationen till b_1 densamma som startstationen till b_2 och ankomsttiden till b_1 är mindre än avgångstiden till b_2 . Vad det formellt betyder att en tidpunkt är mindre än en annan beror på hur vi väljer att formalisera cyklisk tid.

Tidtabellspecifikationen ger också villkor på domänvariablerna:

- Dels konjunktionen av domänvillkoren på domänvariablerna, dvs konjunktionen av villkoren på de ursprungliga intervallen inom vilka domänvariablerna får variera.
- Dels konjunktionen av trippvillkoren på domänvariablerna. Med trippvillkor menas de temporala villkor som gäller ben som följer på varandra i en tripp.

Den sammansatta konjunktionen av dessa två konjunktioner benämns *tidtabellvillkoret*, eller *TTV*, och är det villkor som tidtabellspecifikationen ställer på domänvariablerna.

Vid genereringen av jobb och arbetsperioder får man i varje steg, det vill säga då ett ben läggs till en sekvens av ben eller då två sekvenser av ben sätts samman, en mängd villkor att lägga till de villkor man redan har. I varje sådant steg sker en *propagering*, det vill säga en beräkning av hur domänvariablernas domäner begränsas av den totala mängden villkor. Det är därför kostsamt att bygga en stor mängd arbetsperioder och man bör försöka undvika att bygga samma sekvens av ben flera gånger.

4.7 Konsistens och Koherens

Låt oss säga att ett godtyckligt villkor C är *konsistent* om $TTV \& C$ är satisfierbart. Om konjunktionen av en mängd villkor är konsistent så sägs villkoren vara *konsistenta med*

varandra. Låt oss säga att en *arbetsperiod är konsistent* om motsvarande arbetsperiodvillkor är konsistent och låt oss analogt säga att en mängd arbetsperioder är konsistenta om den motsvarande mängden arbetsperiodvillkor är konsistenta med varandra. På samma sätt låter vi en *konsistent personalslinga* och ett *konsistent personalomlopp* beteckna att motsvarande slingvillkor respektive omloppsvillkor är konsistent. Låt oss säga att en arbetsperiod a är konsistent med villkoret C om $C_a \& C$ är konsistent, där C_a är arbetsperiodvillkoret som motsvarar a . Låt oss rent allmänt använda *inkonsistens* till att beteckna motsatsen till konsistens.

Givet två arbetsperioder a_1 och a_2 låter vi $s(a_1, a_2)$ beteckna personalslingan som består av a_1 följt av a_2 och säger att paret (a_1, a_2) satisfierar vilovillkoret om startstationen till a_2 är slutstationen till a_1 och en vila får plats mellan a_1 och a_2 . Med att en vila får plats mellan a_1 och a_2 menar vi följande. Låt arr vara den tidigaste punkt då a_1 slutar som är konsistent med arbetsperiodvillkoret till a_1 och dep den senaste punkt då a_2 börjar som är konsistent med arbetsperiodvillkoret till a_2 . Om $dep - arr$ är större än minimala antalet timmar hos en vila säger vi att en vila får plats mellan a_1 och a_2 . Låt oss vidare säga att (a_1, a_2) satisfierar cykelvillkoret om startstationen till a_2 är slutstationen till a_1 . Paret (a_1, a_2) satisfierar då slingvillkoret om (a_1, a_2) satisfierar cykelvillkoret och vilovillkoret.

Vi gör följande observationer gällande arbetsperioder:

- Arbetsperioder som var och en för sig är konsistenta kan tillsammans bilda en inkonsistent mängd arbetsperioder.
- Även om arbetsperioderna a_1 och a_2 är konsistenta med varandra och (a_1, a_2) satisfierar slingvillkoret så kan personalslingan $s(a_1, a_2)$ vara inkonsistent. I detta fall säger vi att arbetsperioderna a_1 och a_2 är slinginkoherenta.
- Även om en mängd arbetsperioder är konsistent och kan bilda en mängd täckande personalslingor så är det möjligt att de inte kan bilda ett konsistent personalomlopp. I detta fall säger vi att mängden arbetsperioder är omloppsinkoherent.

Anledningen till slinginkoherens är att konjunktionen av arbetsperiodvillkoren till a_1 och a_2 inte är konsistent med kravet på vila av en viss längd mellan a_1 och a_2 .

Låt en *vändning* vara ett par ben (b_1, b_2) och låt vändvillkoret för (b_1, b_2) vara definierat på samma sätt som för ett par av succesiva ben i en arbetsperiod. Liknande inkoherenser som gäller arbetsperioder gäller då också för vändningar.

4.8 Värderingar

Vi har tidigare använt uttrycken “bra” och “hög kvalité” om arbetsperioder. Detta avsnitt avser att belysa vad som menas med detta. Huvudidéerna bakom vad som menas med ett bra jobb eller en bra arbetsperiod är följande, där den första har högst prioritet och den sista lägst:

1. Ju mer riktigt arbete desto bättre.
2. Ju kompaktare desto bättre, dvs ju mer riktigt arbete det är i förhållande till längden.

3. Ju mindre inskränkningar på domänvariabler desto bättre.

Med *riktigt arbete* menas det arbete som ofrånkomligen måste schemaläggas, det vill säga tågjänst och växling.

Man bör observera att kompaktheten skiljer sig från de två andra värdena därigenom att den beror på längden hos en arbetsperiod. Det vill säga, kompaktheten beror på värdet av vissa domänvariabler och därigenom måste den också betraktas som en domänvariabel, dvs variera beroende på hur de ingående domänvariablerna varierar.

4.9 Sökta karaktärer hos tidtabellspecifikationen

Avsikten med arbetsperiodanalysen är att finna det som, för en given mängd arbetsperioder, är nödvändigt eller gynnsamt för att ett bra personalomlopp skall kunna konstrueras. De saker vi väljer att undersöka om de är gynnsamma eller nödvändiga för bra personalomlopp kallar vi tidtabellspecifikationens *karaktärer*. Vi tänker oss att arbetsperiodanalysen omfattar följande grupper karaktärer.

- Nödvändiga arbetsperioder.
- Nödvändiga delar av arbetsperioder.
- Det som är gemensamt för många bra arbetsperioder.

4.9.1 Nödvändiga arbetsperioder.

Vi kan tänka oss olika grader av hur nödvändig en arbetsperiod är. Om det bara går att finna en arbetsperiod där ett visst ben ingår får den anses nödvändig av högsta grad. Om det finns flera arbetsperioder där ett ben ingår men bara en bra arbetsperiod, kan arbetsperioden också anses nödvändig av lägre grad. Om det till ett ben bara finns två eller tre (bra) arbetsperioder där benet ingår bör detta noteras, för att göra en senare undersökning av om någon av dessa arbetsperioder kan anses omöjlig.

4.9.2 Nödvändiga delar av arbetsperioder.

Vid genereringen av arbetsperioder bör man kontrollera om alla de genererade arbetsperioderna till ett visst ben har gemensamma delar, det vill säga gemensamma delsekvenser av ben.

4.9.3 Begränsning av domäner

Rent allmänt vill vi undvika att producera disjunktioner av villkor som utdata från TUFF-PO, ty detta leder som regel till att man i något senare skede i tågplanearbetet tvingas att antingen testa vilket av flera alternativ som är bäst, vilket kan leda till en oacceptabelt ökad komplexitet, eller på måfå välja ett av alternativen, vilket i så fall TUFF-PO redan från början kunde ha gjort. Detta innebär inte att vi vill undvika att analysera disjunktioner av villkor i TUFF-PO.

Vi föreslår, som ett exempel på något som är gemensamt för många bra arbetsperioder, att domänvariablernas domäner begränsas på följande sätt. Låt A vara den genererade mängden arbetsperioder. Låt varje domänvariabel X begränsas till den domän av värden v så att tilldelningen $X := v$ är konsistent med någon av de arbetsperioder i A där X finns, givet att alla övriga domänvariablers domäner har begränsats på samma vis. Att X finns i en arbetsperiod betyder här att X är avgångstiden till ett ben i arbetsperioden. Metoden att genomföra denna begränsning är att genomlöpa alla domänvariabler och för en domänvariabel i taget begränsa domänen och att därefter upprepa genomlöpningen av och begränsningen av domäner till alla domänvariabler till det att inte några fler begränsningar kan göras. Om begränsningarna av domänerna är stora kan det kanske vara lämpligt att efter denna begränsning göra om genereringen av arbetsperioder.

Låt oss ge en mer formell beskrivning av vad det, i varje steg i metoden ovan, betyder att begränsa domänerna till domänvariablerna. Låt C vara ett villkor och X en domänvariabel. Låt oss med *domänen till X given av C* mena mängden av värden v så att tilldelning $X := v$ är konsistent med C . Låt oss använda $C(X)$ till att beteckna *domänen till X given av C* . $C(X)$ är alltså en *projektion* av C på X . Låt, som ovan, A vara den genererade mängden av arbetsperioder som skall undersökas. Låt a_1, \dots, a_n vara mängden av arbetsperioder i A där domänvariabeln X ingår. Låt C_i vara arbetsperiodvillkoret till arbetsperioden a_i , för alla i , $1 \leq i \leq n$. Bilda disjunktionen av alla dessa arbetsperiodvillkor $C = C_1 \vee \dots \vee C_n$. Domänen till X skall då i ett steg i den angivna metoden begränsas till $C(X)$. Observera att $C(X) = C_1(X) \cup \dots \cup C_n(X)$.

4.10 Exempel på karaktärer som inte bör beaktas

Ett exempel på en karaktär som inte bör beaktas är antalet förekomster av en viss *vändning* i den genererade mängden arbetsperioder. Det finns inget som säger att för den mängd av arbetsperioder där vändningen förekommer så gäller att varje par av arbetsperioder antingen är inkonsistent eller omloppsinkohärent. Om detta är fallet är inte vändningen mer gynnsam för ett bra personalomlopp än en vändning som bara förekommer i en enda arbetsperiod som är konsistent och omloppskoherent med en stor mängd arbetsperioder.

5 Prototypimplementationen

Följande avsnitt beskriver den prototypimplementering för personalplanering i tidiga faser, som genomförts baserat på de idéer som diskuterats i tidigare avsnitt. Denna prototyp är på många sätt förenklad i förhållande till vad en produktionsanpassad tillämpning skulle innehålla, och skall inte ses som en färdig produkt eller produktprototyp utan som en validering av de idéer som redogjorts för ovan. Vi har i prototypen vinnlagts oss om att genomföra så många steg av de beskrivna som möjligt och hantera en storlek på exempel som är visserligen mindre än det totala omfånget på det verkliga problemet (en veckas trafik för Green Cargo), men ändå representerar storleksmässigt ett icke-trivialt problem, i princip all godstågstrafik med RC-lok norr om en linje Hallsberg-Stockholm. Enligt uppgift motsvarar det ungefär 1/6 av den totala godstågstrafiken. Vidare har vi förenklats ett antal databaser, vilket beror antingen på att vi har saknat

information eller på att informationen varit för omfattande för att vi med begränsade resurser skall kunna realisera en databas i prototypen.

Prototypen arbetar i flera steg, enligt vad som beskrivits tidigare i denna rapport. Varje steg bygger på att det tidigare steget har slutförts och data från det tidigare steget används i nästa steg. Stegen är

1. identifiering av bytesplatser och rastplatser
2. bensyntes
3. jobbgenerering
4. generering av arbetsperioder, samt
5. framtagning av begränsningsdata.

Varje steg är kortfattat beskrivit nedan.

5.1 Identifiering av bytesplatser

Syftet med identifiering av bytesplatser är att identifiera ett antal strategiskt viktiga stationer dit byten och raster huvudsakligen skall förläggas. Valet av sådana orter styr mycket av den fortsatta planeringen, och genom att välja strategiska orter kan effektiva personalslingor väljas senare. Genom att t.ex. lägga byten och raster till platser där många tåg passerar ökar möjligheterna till effektiva byten. Eftersom trippernas ankomst respektive avgångstid inte är fixerad finns här stora möjligheter att skapa utrymme för effektiva byten genom att dels välja plats för bytet, dels utnyttja slacket i tidtabellspecifikationen.

Vi har i prototypimplementationen tagit hänsyn till att stora orter kan ha flera stationer vilka kan betraktas som ungefärligen samma, dvs personal kan vända mellan två ben även om de inte ankommer respektive avgår från identiskt samma station, med någon liten straffkostnad. T.ex. så kan Centralstation och Hagalund i Stockholm betraktas som samma station i detta sammanhang, och därigenom ger vi poäng till den sammansatta stationen (låt oss kalla den "Stockholm") och inte Centralstation då ett tåg passerar genom Stockholm.

Flera alternativ finns för hur identifieringen skall ske. T.ex. kan följande alternativ eller kombinationer av alternativ nämnas:

- Välj de stationer där flest tåg passerar.
- Välj de stationer där tåg passerar efter att ha kört i närheten av den tid som är tillåtet för tågföraren (t.ex. efter 4 timmars körning).
- Välj de stationer där flest tåg passerar i kombination med hur nära i tiden de ligger (dvs om många tripper ligger när varandra i tiden på samma station får stationen fler poäng än om de ligger glest i tiden).
- Ge extra poäng till de stationer som är stationeringsorter.
- Ge extra poäng till de stationer där passresor kan företas på ett billigt sätt.

- Ge poäng/välj stationer på ett sådant sätt att de valda stationerna inte ligger för nära varandra
- Ge poäng till de möjliga bytesplatser som passeras, men ge avsevärt mer poäng (t.ex. en faktor 10) till de platser som passeras inom bra bytestid (t.ex. efter 4 timmar).
- Ta med vissa stationer som av erfarenhet visar sig vara nödvändiga för byten (t.ex. glest trafikerade områden kommer att med vissa kombinationer av ovanstående punkter ge upphov till att det saknas rimliga bytesplatser för en del tripper).

I prototypimplementationen har vi endast implementerat den andra punkten ovan, men det är givetvis enkelt att lägga till ytterliggare steg och förfina metoden, eller att byta ut den. Syftet i denna förstudie var att skapa en första ansats och skelett till algoritmen.

Huvudloopen går igenom alla tripperna en och en. För varje tripp följs de ingående slottarna och varje gång som vi passerar en möjlig plats där byte och rast kan ske, dvs dels att uppehållet på stationen är mer än 15 minuter för att möjliggöra byte, dels att stationen är upptagen som en rastplats i databasen för möjliga rastplatser, dels att stationen ligger på tillräckligt långt avstånd från startstationen eller tidigare raststation, erhåller denna station en poäng. "Tillräckligt långt" är i prototypen mellan 4 och 4.5 timmar. Om ingen raststation hittas lämnar algoritmen ifrån sig ett felmeddelande om att det är för långt mellan rastplatserna för att skapa ett giltigt ben. Alla platser som hittats inom intervallet erhåller en poäng och svepet längs slottarna återstartas från den sista rastplatsen funnen.

Då algoritmen terminerar är resultatet en databas av poängsatta bytes- och rastplatser, av vilka ett visst antal väljs, i prototypimplementationen väljs de med högst poäng upp till ett visst procenttal av de som överhuvud taget fått poäng.

5.2 Bensyntes

Detta steg skapar ben, dvs atomära odelbara arbetsuppgifter för lokförare, baserat på trippernas slottar och det föregående bytesplatsurvalet. Utöver benen skapas som resultat också relationer, dels relationer mellan benen, dels relationer mellan benen och tidtabellvillkoren (trippens utgångsdata och utgångsrelationer givna i tidtabellspecifikationen, se 4.6).

När ben skapas så bör en avvägning ske mellan längden på benen och antalet ben. Det är enkelt att se att ju kortare benen är desto bättre möjligheter för att skapa effektivare sammansättningar (utrymmet att skapa lösningar är större), men samtidigt ökar komplexiteten i senare steg med antalet ben vilket kan leda till problem. Detta betyder att även detta steg är viktigt och att en välavvägd benmängd är viktig för de följande stegen.

Vi har i prototypimplementationen inte tagit hänsyn till att olika krav gäller för dagtrafik och natttrafik, då detta komplicerar bilden mycket eftersom avgångs- och ankomsttider inte är fixerade och vi därigenom inte vet hur mycket av ett ben som ligger inom respektive dag- och nattarbete.

Det finns åtminstone dessa alternativ till generering:

1. Skapa ben genom att slå samman alla slottar mellan varje identifierad bytesplats, eller till dess att trippen når sin slutdestination. Dessa sammanslagna sekvenser av slottar bildar benen.
2. För att avsluta ett ben, måste hänsyn tas till att trippen måste kunna göra uppehåll i minst 15 minuter. Annars fortsätter vi att bygga benet vidare.
3. Bygg benen så långa som möjligt, dvs upp till 4.5 timmar, även om de passerar en möjlig bytesplats. Detta kan dock vara kontraproduktivt, och här bör ett avvägt beslut tas innan man väljer att fortsätta förbi en vald bytesplats. T.ex. kan det vara bra att fortsätta förbi en bytesplats med låg poäng men avsluta benet om bytesplatsen har många poäng.
4. Undvik att skapa ben som är mindre än en viss längd.

Även detta steg utformas som ett svep över samtliga tripper. För varje tripp, starta från utgångsstationen och summera slottar fram till första möjliga identifierade bytesplats. I prototypimplementationen har punkt ett och två ovan använts, dvs om trippen gör ett möjligt uppehåll på stationen på minst 15 minuter så skapas ett ben av de summerade slottarna, och ett nytt ben påbörjas med utgångspunkt från denna station. Vidare så skapas relationer mellan benen baserat dels på deras ordning (det efterföljande benet måste starta åtminstone efter de föregående benet), dels mellan benen och trippens krav på avgångar och ankomster givna i tidtabellspecifikationen.

Vid genereringen av benen kan tre olika fall inträffa i samband med att ett ben skapas, beroende på de varierbara avgångs- och ankomsttiderna vilket leder till att benets längd inte är fixerat.

- Benet ligger inom den valda maxlängden, för alla fixeringar av avgångar och ankomster.
- Benet kan möjligen bli för långt beroende på hur avgångar och ankomster fixeras för det ingående slottarna.
- Benet är med säkerhet vara för långt.

I det första fallet är det inga problem, i det andra fallet genereras en varning och en restriktion skapas för benet att det skall vara kortare än maxlängden, och i fall tre genereras en varning men benet behålls i brist på alternativ. I det sista fallet kan det diskuteras om benet skall finnas med eller inte, något som behöver studeras ytterligare för att avgöras. Varje ben får också en poäng som mäter dess effektivitet. Denna poäng kan modifieras beroende på vad som skall premieras, men t.ex. kompakthet (se stycke 4) är lämpligt att beakta.

5.3 Jobbgenerering

Detta steg är avsevärt mer komplext än de tidigare stegen, huvudsakligen beroende på den kombinatoriska mångfalden som uppstår här. De tidigare stegen var deterministiska då inte flera alternativ genererades, medan avsikten med detta steg är att generera en mångfald alternativa kombinationer av ben. Denna mängd av alternativa kombinationer, som vi kallar för jobb så länge de är sammanhängande utan rast (se 3.3), ligger

senare till grund för analyser av vilka goda egenskaper som kan identifieras respektive vilka begränsningar som skall göras för att framför allt tidtabelläggen inte skall förstöra möjligheterna för OPO (se figur i stycket 2.3). Det är också i detta steg som de olika arbetsuppgifterna (köra tåg, avställning, påställning, byte, passresor etc) och kraven på hur dessa sitter ihop skall börja hanteras.

Resultatet av det förra steget var ett antal ben, representerande delar av tripperna, samt relationer som binder samman ben respektive binder benen till tripperna och deras relationer. Uppgiften i detta steg är att kombinera ben på ett sådant sätt att lämpliga jobb skapas, dvs sekvenser av ben, passresor, byten och andra uppgifter som blir max 4,5 timmar långa.

Huvudloopen går igenom ben för ben och bygger jobb utifrån detta ben. I prototypen byggs jobben framåt, dvs ben läggs endast till *efter* det valda benet. Ben väljs lokalt bäst först, dvs givet ett ben så rangordnas de möjliga valen, och det just nu bästa valet görs först. Prototypen försöker sedan med näst bästa val osv ner till en satt förgreningsfaktor, eller att ett giltigt jobb inte kan skapas. Här kan ytterligare begränsningar tänkas, t.ex. att begränsa längden mellan två ben. Då det inte går att lägga till fler ben till det jobb som håller på att skapas anses jobbet färdigt och sparas i databasen. Därefter använder prototypen det underliggande Prolog-systemet för att åstadkomma ett nytt val där det sista valet gjordes, om det finns något (s.k. backtracking, se SICStus användarhandledning¹). Varje färdigt jobb förses också med en poäng, vilken uttalar sig om hur bra jobbet är. Poängsättningen är konfigurerbar, men typiskt vill man här väga in de ingående benens poäng samt hur väl jobbet fylls ut (se komplement 4).

Då genereringen av jobb är klar finns ett första utgångsmaterial att göra analys på, men för att få ytterligare krav på raster mm som krav på tidtabellen så måste även arbetsperioder genereras, vilket beskrivs i nästa stycke.

5.4 Generering av arbetsperioder

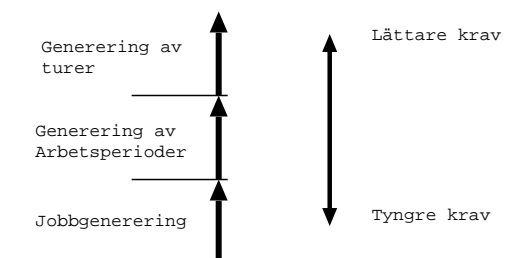
Generering av arbetsperioder sker på ett liknande sätt som jobb-genereringen. Givet ett antal jobb från föregående steg skall ett antal arbetsperioder tas fram. Som tidigare beskrivits består en arbetsperiod av jobb med mellanliggande raster och eventuellt dygnsvila, med krav på hur lång rasten mellan jobben får vara (se avsnitt 3).

I prototypen har vi förenklat bilden i två avseenden jämfört med vad ett personalplaneringssystem gör på en fastställd tidtabell. Detta beror på att syftena skiljer sig mellan TUFF-PO och t.ex. personalplaneringssystemet OP på Green Cargo/SJ. Vårt syfte är inte att producera färdiga personalomlopp, utan att producera underlag som begränsar tidtabellläggningen så att det efterföljande personalplaneringssystemet OPO kan hitta effektiva turer, dvs "förbereda marken" för optimerande OPO.

Den första förenklingen är att vi konstruerar enbart arbetsperioder bestående av två jobb med mellanliggande rast, dvs i princip en dags arbete. Orsaken till att vi inte skapar flera arbetsperioder i följd är att tidsutsträckningen på den mellanliggande vilan jämförelsevis inte har så stor betydelse om den blir lite längre eller kortare, och då detta påverkar efterföljande arbetsperiod så får tidsutsträckningen på vilan stor betydelse för var i tiden arbetsperioden förläggs, större än vilans relativa betydelse. De flesta viktiga begränsningar uppstår på grund av byten mm där omstigningen för personalen sker

¹ SICStus Prolog Manual, <http://www.sics.se/sicstus/>

inom “närtid”, och det är framför allt dessa vi vill fånga med TUFF-PO. Såsom visas i figuren nedan så är de krav som tas fram för jobb relativt sett viktigare än t.ex. krav på dygnsvilor.



Den andra förenklingen, vilket hänger ihop med den första, är att vi har släppt kravet på geografisk slutenhet, eftersom TUFF-PO inte konstruerar några större objekt än arbetsperioder, vilka maximalt sträcker sig över en arbetsdag. Det vore för restriktivt att kräva att samtliga arbetsperioder skulle återvända till utgångspunkten, dvs låta arbetsperioder få kravet att vara geografiskt slutna, eftersom det inte är ett krav i den efterföljande personalplaneringen i OPO. Vårt syfte med TUFF-PO är ju att skapa förutsättningar för den efterföljande “riktiga” personalplaneringen, och då är det viktiga att ta fram de riktigt nödvändiga kraven på tidtabelläggnen så att de effektiva personalvändningarna behålls. Vi har då valt att generera ett representativt urval av arbetsperioder, vilka vi senare utnyttjar för att skapa restriktioner på tidtabelläggnen.

En fortsättningsstudie bör dock utvärdera att lägga till kravet på geografisk slutenhet, och att dygnsvila tas med i beräkningen. Ett möjligt sätt att premiera återkomst inom samma “arbetsdag” vore att premiera arbetsperioder vilka startar och återvänder till samma geografiska ort.

Utifrån resonemanget ovan har vi satt en arbetsperiod till att bestå av två jobb med en mellanliggande rast, som skall vara minst 30 minuter. Generingen sker enligt samma princip som för jobb, dvs för varje jobb sökes andra jobb att kombinera med (med rast emellan). Valet är begränsat till ett visst antal efterföljande jobb och valet sker med de bästa kombinationerna först enligt en viss specifik kostnadsfunktion som är baserad på väntetid och ev. passresa. Här kan man givetvis tänka sig betydligt mer sofistikerade urval, t.ex. återkomma till utgångspunkten, eller till en större ort (detta skulle öka kombinationsmöjligheterna då geografiskt slutna arbetsperioder skapas), eller att kombinera upp till en viss kostnad (dvs inte upp till ett fastställt antal jobb utan till dess att det blir för dyrt att kombinera med jobbet).

Arbetsperioderna åsätts poäng, likhet med ben och jobb. Precis som för dessa är detta konfigurerbart, och i princip så är samma komponenter som nämnts för jobb relevanta för arbetsperioder.

5.5 Tidtabellkrav, specifikationskrav och OPO-råd

Syftet med TUFF-PO är dels att ta fram begränsningar och krav för tidtabelläggnen, vilket i figuren i stycke 2.3 kallas för tidtabellkrav, dels producera råd och tips till

OPO samt påpeka brister i nuvarande tidtabellspecifikation vilket i figuren är benämnt specifikationskrav. Vi kommer i detta stycke att referera gemensamt till dessa utdata som TUFF-PO tar fram som *begränsningsdata*.

Begränsningsdata tas fram från både de genererade jobben och arbetsperioderna. Det är framför allt detta steg som genererar information som är användbar i efterföljande tidtabellkonstruktionsprocessen, och som på olika sätt har belysts och diskuterats i denna rapport, men även tidigare steg producerar data som är av intresse. T.ex. kan nämnas:

- Identifieringen av bytesplatser producerar förslag på vilka orter till vilka byten och raster helst bör förläggas. Detta är av intresse för OPO, vilken kan förenkla beräkningen genom att minska antalet punkter som är föremål för rast (dvs gör det möjligt att introducera s.k. "lås" mellan benen på orter där byten inte är aktuella).
- Benkonstruktionen är likaså intressant ur OPOs synvinkel, genom de förslag på längre ben som TUFF-PO konstruerat.
- Jobben kan även de vara av intresse för OPO, framför allt om det är så att ett visst jobb förekommer ofta i det data som TUFF-PO genererat, och om vissa delar av jobben återkommer ofta (t.ex. om ett ben alltid följs av ett annat, vilket antyder att denna kombination är fördelaktig).
- Ben som är för korta (dvs kortare än ett visst mått) eller för långa bör undersökas eftersom det visar på att något i tidtabellspecifikationen bör ändras, eller att en bytesplats bör introduceras (identifieringen av bytes- och rastplatser syftar ju till att minska antalet platser, och det kan vara nödvändigt att återintroducera någon plats).
- Jobb som bedöms som dåliga bör undersökas vad detta beror på, och om det är något i tidtabellspecifikationen som leder till detta.

Vi kommer att exemplifiera några olika varianter av begränsningsdata som vi har undersökt:

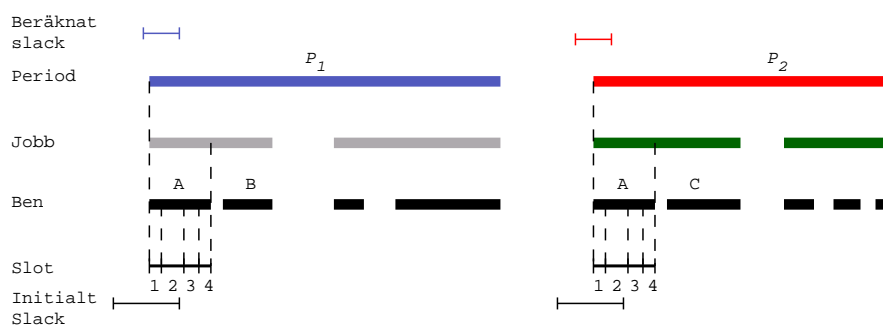
- Begränsning av avgångstider (ankomsttider) för slottar.
- Kalkyl av vilka ben som ingår i dåliga jobb (arbetsperioder).
- Varning om ett ben förekommer i färre jobb än ett visst gränsvärde.
- Motsvarande som ovan för jobb och arbetsperioder.
- Jämförelse av poängdata för ben, jobb och arbetsperioder

Den sista punkten är en ren inspektion av det genererade datat. I avsnitten nedan beskrivs de övriga punkterna, speciellt den första då vi betraktar denna punkt som en av de viktigare analyserna vi genomfört.

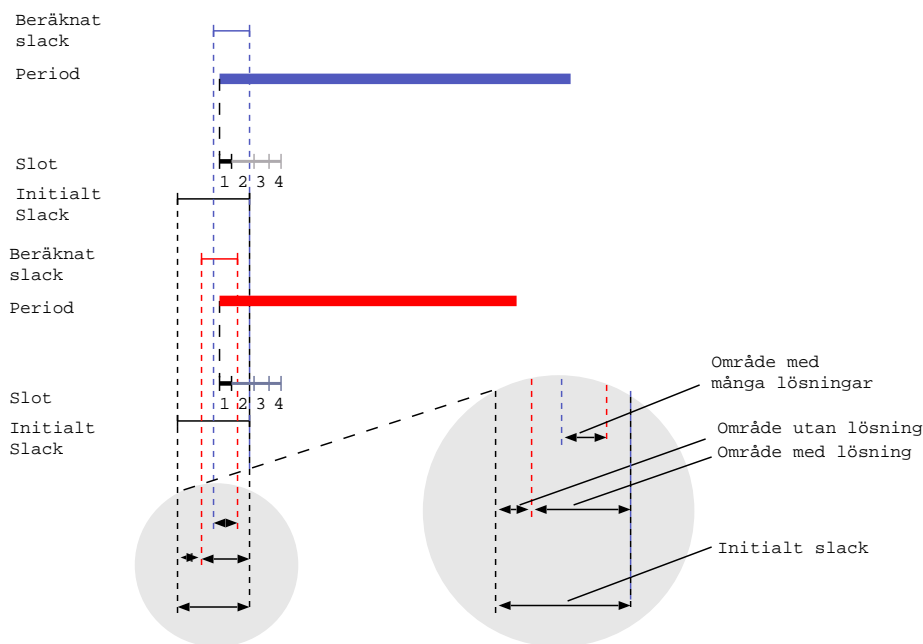
5.5.1 Begränsning av tidsdomäner för slottar

En mycket viktig del av begränsningarna som kan tas fram utgör de inskränkningar som arbetsperioderna lägger på de ingående benen, och genom dessa i sin tur på de ingående slottarna. Under konstruktionen av arbetsperioderna inskränks avgångs- och ankomsttiderna för de ingående benen. Dessa begränsningar är grundmaterial för flera begränsningar, t.ex. vilka värden till avgångs- och ankomstvariablernas domäner som inte ingår i någon arbetsperiod, och vilka värden som förekommer i många arbetsperioder.

I figuren nedan är två arbetsperioder genererade från ben, som i sin tur består av slottar. Då jobben och arbetsperioderna skapades ledde det till inskränkningar på värddomänerna för avgångsvariablerna till slottarna. I figuren är den första slottens initiala slack inritad samt dess kalkylerade slack efter två arbetsperioder är skapade.



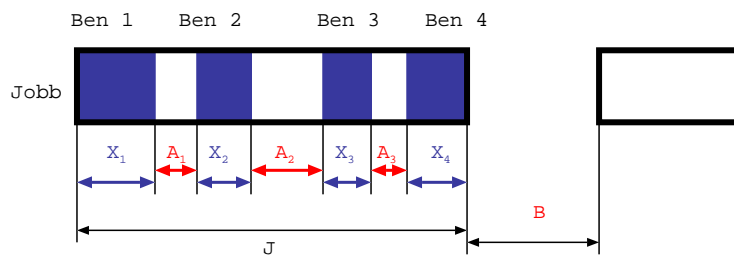
Genom att lägga de två arbetsperioderna över varandra som i figuren nedan kan vi se att de två har olika inskränkningar på avgångsvariablernas domäner. Komplementet till unionen av dessa domäner utgör de värden som det inte finns någon arbetsperiod som kan satisfieras. Snittet av domänerna utgör de värden som återfinns i alla arbetsperioderna.



Exemplet visar endast avgångstiden för den första slotten i två arbetsperioder, men motsvarande begränsningar för de resterande slottarna i respektive arbetsperioder kan givetvis genereras fram. Genom att genomlöpa samtliga arbetsperioder som ett visst ben ingår i (dvs med samtliga begränsningar på benet som arbetsperioden ger upphov till) och spara de inskränkningar på tidsfönstret som benet får i respektive arbetsperiod, kan dels begränsningar göras på tidsfönstret till de värden som gör att det finns arbetsperioder som benet ingår i, dels föreslå, som ytterligare inskränkning, avgångstider som flera arbetsperioder understödjer (tidpunkter som gör att benet ingår i flera arbetsperioder, dvs i någon mening bra tidpunkter). Eftersom varje ben är en sekvens av slottar, och varje slott bara finns i ett ben, så begränsas avgångar och ankomster för alla slottar genom detta. Dessa begränsningar av den ursprungliga tidtabellspecifikationen är mycket viktigt att ta hänsyn till vid tidtabelläggnen för att bibehålla bra alternativ till OPO.

5.5.2 Dåliga och bra ben och jobb

Ben och jobb kan vara bättre eller sämre på flera olika sätt. För ben så är det framför allt deras kombinationsförmåga med andra ben som avgör hur bra benet är, vilket kan mätas på flera sätt. För jobb tillkommer fyllnadsgraden av jobbet som parameter för hur bra jobbet är (se figur nedan).



I exemplet är fyllnadsgraden för det beskrivna jobbet $\frac{X_1+X_2+X_3+X_4}{J}$. För ben 2 är avståndet till ben 1 A_1 och till ben 3 A_2 . För det beskrivna jobbet är avståndet till nästa jobb (för den beskrivna arbetsperioden) B . Notera att det normalt finns flera jobb för varje ben, liksom det finns flera arbetsperioder för varje jobb. Vi är således intresserade av hur t.ex. ett ben förekommer i samtliga jobb. Om benet genomgående förekommer i jobb som betraktas som dåliga så skall detta rapporteras. Motsvarande gäller för jobb.

I prototypen har vi flera rutiner för att rapportera framför allt sådana ben och jobb som bedöms som dåliga, av vilka några beskrivs nedan.

Ben förekommer i för få jobb

Ett mått på om ett ben är bra eller dåligt är hur många jobb det förekommer i (dvs att benet är ett alternativ som efterföljare till andra ben). Detta är en enkel operation, för varje ben kontrolleras hur många jobb det förekommer i och det är lägre (högre) än ett visst nyckeltal rapporteras detta ben. Notera att detta är ett ganska svagt mått, eftersom det är beroende av hur genereringen går till och vilka jobb som skapas (alla möjliga jobb genereras inte, de blir för många).

Jobb förekommer i för få arbetsperioder

Utförs analogt som beskrivits i stycket ovan.

Ben förekommer i för dåliga jobb (arbetsperioder)

Varje arbetsperiod åsätts en poäng beroende på ett antal parametrar, bl.a. hur kompakt arbetsperioden är, hur nära dess maximala längd det är, mm. Denna poäng används för att ta fram det mått vi är intresserade av här, och definieras som "ta fram de ben, där X % eller fler av benets förekomster i de genererade arbetsperioderna har en poängsättning som är lägre (högre) än Y". Typiskt kan X vara 80% av de sämsta (bästa) förekomsterna och Y i sin tur uttryckas som en funktion varierande över de genererade arbetsperioderna, t.ex. de 15% sämsta (bästa) arbetsperioderna. Ben som förekommer i för dåliga jobb bör undersökas, och eventuellt skall tidtabellspecifikationen förändras så att de dåliga benen och jobben försvinner.

5.6 Resultat

Vi har testat prototypen på ett antal exempel, bl.a. genererat arbetsperioder för en veckas godstrafik i området norr om en linje Hallsberg-Stockholm (ca. 1/6 av all godstrafik). Observera att många av dessa tåg kör långa sträckor, varför omfånget på antal ben antagligen är större än 1/6-del. Några mått på data (ursprungligt och genererat) finns i tabellen nedan. Jobb och arbetsperioder är genererade med en förgreningsfaktor två, dvs för varje ben (jobb) har vi provat de två bästa efterföljarna.

uppgift	antal
slottar	29425
ben	2150
jobb	19472
perioder	38983

Resultatet kan sammanfattas enligt följande:

- Den framtagna modellen fungerar för att beräkna/generera ben, jobb och arbetsperioder.
- De framtagna arbetsperioderna begränsar avgångstider (ankomsttider) såsom beskrivits i avsnitt 5.5.
- Dåliga ben kan utskiljas och studeras för att se vad som orsakar detta.
- En uppsättning bytesplatser väljs på basis av det statistiska underlaget, och ben skapas utifrån dessa valda bytesplatser.

Effektiviteten hos de genererade arbetsperioderna är i medeltal mellan 62% och 75%. Med "effektivitet" menas här faktiskt körd tid (tid då tåget rullar, dvs inte bytestid mm) delat med arbetsperiodens totala tid innefattande byten mm. Dessa siffror skall dock ses som en validering av att de genererade arbetsperioderna är "vettiga" och inte som absoluta siffror. Att de ligger i ett spann beror på att tidtabellen inte är fixerad ännu, och således vet vi inte ännu vilka faktiska körtider som benen får, däremot inom vilket spann som körtiden ligger. Som jämförelse kan nämnas att dagens siffra enligt uppgift är ca: 50%.